



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EERIKKI SALPIOLA  
HATTULAN MERVEN BIOJALOSTAMOON SOVELTUVAT TEKNI-  
SET RATKAISUT  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty teknis-  
ten tieteiden tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 8. toukokuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**SALPIOLA, EERIKKI:** Hattulan Merven biojalostamoon soveltuvat tekniset ratkaisut

Diplomityö, 85 sivua

Kesäkuu 2013

Pääaine: Voimalaitostekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: biojalostamo, SNG, biokaasu, kaasutus, pyrolyysi, torrefiointi, pelletti, Hattula, Mervi

Bioenergian käytön lisääminen kestävästi onnistuu ottamalla huomioon käytetyn biomassan koko elinkaaren aikaiset vaikutukset sekä ilmakehän hiilidioksidipäästöihin, että maankäyttöllisiin vaikutuksiin. Lisäksi on huomioitava, että biomassan hyödyntäminen energiakäytössä ei korvaa sen käyttömahdollisuutta ihmisen ravinnonlähteenä. Suomen metsät tarjoavat mahdollisuuden bioenergian kestäväan käyttöön. Metsähakkeen energiakäytön odotetaan lähes kaksinkertaistuvan vuoteen 2020 mennessä. Ajavia voimia uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi ovat muun muassa EU:n sitovat ilmastotavoitteet. Puupohjaisten polttoaineiden hyödyntäminen energiantuotannossa on mahdollista suoran polttamisen lisäksi biojalostamoiden raaka-aineena. Biojalostamon erilaisia teknisiä konsepteja on useita, joista intensiivisen tutkimuksen kohteina ovat tällä hetkellä termokemialliset jalostustekniikat, kuten kaasutus, pyrolyysi ja torrefiointi. Nämä tekniikat ovat tällä hetkellä pitkälti kaupallisessa demonstroitivaiheessa.

Hattulan Merven teollisuusalueelle on suunnitteilla metsäenergiaa hyödyntävä biojalostamo. Merven alueen valintaa biojalostamon sijainniksi puoltaa logistisesti keskeinen sijainti Etelä-Suomen alueella sekä läheisyys olemassa oleviin kaukolämpö- ja maakaasuverkkoihin. Ympäröivillä alueilla on arvioitu olevan runsaasti käyttämätöntä metsäpotentiaalia, jotka on mahdollista valjastaa biojalostamon käyttöön.

Biojalostamon tekniseksi ratkaisuksi sopii biomassan kaasutukseen ja kaasun metanointikäsittelyyn perustuva synteettisen luonnonkaasun, eli SNG:n tuotanto. SNG on ominaisuuksiltaan maakaasun kaltaista, jolloin sen kuljetuksessa on mahdollista hyödyntää olemassa olevaa maakaasuverkkoa. Sen käyttö polttoaineena on mahdollista sekä olemassa olevissa voimalaitoksissa, sekä liikenteessä. Julkiseen materiaaliin nojaavien alustavien mitoitusten ja kustannusarvioiden mukaan SNG:tä tuottava biojalostamo olisi myös taloudellisesti kannattava, mikäli käytetyn raaka-aineen sekä tuotetun jalosteen hinnat ovat optimaaliset. Torrefioitujen pelletin valmistus on myös varteenotettava tekninen vaihtoehto Merven biojalostamoon. Työssä on mitoitettu suuren kokoluokan torrefiointilaitos, jonka kannattavuus riippuu paljolti saatavilla olevan raaka-aineen kustannuksista. Myös puupelletin sekä pyrolyysiöljyn valmistus voivat olla varteenotettavia teknisiä vaihtoehtoja Merven biojalostamoon. Jalostamon teknisestä konseptista riippumatta tärkein kannattavuuteen vaikuttava tekijä on raaka-aineen hinta.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

**SALPIOLA, EERIKKI:** The suitable technical solutions for a biorefinery in Mervi, Hattula

Master of Science Thesis, 85 pages

June 2013

Major: Powerplant Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: Biorefinery, SNG, biogas, gasification, pyrolysis, torrefaction, pellet, Hattula, Mervi

The increased use of bioenergy can be sustainable when the total life cycle emissions and effect on land use are also considered. The use of biomass as an energy source must not replace its potential as human food supply. Finnish forests offer the possibility for sustainable use of bioenergy. Thus it is expected, that the use of woody biomass in energy production will double from its current amount by the year 2020. The driving forces towards increased use of renewable energy are, among others, the binding climate policies set by the EU. Using woody biomass in energy production is possible by conventional combustion and also as an ingredient for biorefineries. The technical solutions for refining biomass are several. Thermochemical refining technologies, such as gasification, pyrolysis and torrefaction, are in the core of intensive research. These technologies are currently in commercial demonstration phase. A biorefinery residing in the industrial area of Mervi in the county of Hattula is currently under pre-planning phase. The biorefinery would be utilizing woody biomass as ingredient. The logistically crucial location in southern Finland and the proximity of already existing district heating and natural gas networks are the key properties for choosing Mervi as the location for the biorefinery. Furthermore, it has been evaluated, that a vast potential of forest biomass, which could be utilized as feedstock the biorefinery, is currently available in surrounding areas. The production of synthetic natural gas, or SNG, through biomass gasification combined with downstream methanation could be a suitable technical solution for the biorefinery. SNG has similar properties to fossil-based natural gas, which allows it to be transported within the existing natural gas network to the end users. It has potential as being suitable for fueling both existing power plants and the transportation sector. According to the preliminary techno-economical evaluation based on public material a biorefinery utilizing this kind of technology would be economically feasible if the prices of ingredients and the end products were optimal. Torrefaction integrated with pelletization also has potential for being a suitable solution for refining technology. A large scale torrefaction plant was evaluated and it was concluded, that its economical feasibility depends largely on the total costs of the ingredients. Conventional pelletization and the production of pyrolysis-oil can also be considerable options for refining technology. The cost of biomass has the most effect on economical feasibility regardless of the refining technology that is used.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen Teknilliselle Yliopistolle Hattulan Kunnan, Hämeen Liiton, Elenia Lämpö OY:n ja Tampereen Sähkölaitoksen toimeksiantona osana mahdollisen biojalostamon rakentamista varten tarvittavia esiselvityksiä. Työn on valvonut professori Risto Raiko Kemian ja biotekniikan laitokselta.

Työn edistymistä ovat olleet seuraamassa Janne Teeriaho ja Heidi Rämö Hattulan kunnasta, Heikki Pusa ja Timo Reina Hämeen Liitosta, Anne Piispanen Elenia Lämpö OY:stä sekä Jussi Laitinen Tampereen Sähkölaitokselta.

Haluan kiittää kaikkia työtä seuraamassa mukana olleita, haastateltuja tahoja hyvästä yhteistyöhengestä, sekä erityisesti Hattulan Kuntaa työtilojen ja erittäin miellyttävien työolosuhteiden ja yhteishengen tarjoamisesta. Lisäksi haluan kiittää Timo Rajalaa asiantuntija-avusta, jolla oli työn toteutuksen kannalta merkittävä vaikutus. Erityiskiitos kuuluu myös professori Risto Raikolle, jolta saamani ohjaus työn aikana oli erittäin tärkeässä asemassa.

Kiitos myös kaikille minua opiskeluaikanani tukeneille tahoille, perheelleni sekä ystävilleni.

Hattulassa 22.5.2013

Eerikki Salpiola

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
1.1	Työn tarkoitus .....	3
1.2	Työn sisältö .....	3
2	Bioenergia maailmassa.....	4
2.1	Tilanne EU:ssa .....	5
2.2	Suomen tilanne.....	7
2.2.1	Bioenergian käyttökohteet ja tuet Suomessa.....	8
3	Biojalostamon mahdollisuudet.....	9
3.1	Edellytykset biojalostamon toiminnalle.....	10
3.2	Termokemialliset jalostustekniikat .....	11
3.2.1	Kaasutus .....	11
3.2.2	Pyrolyysi .....	21
3.2.3	Torrefiointi .....	24
3.3	Biokemialliset jalostustekniikat .....	28
3.3.1	Hydrolyysi ja fermentointi .....	29
3.3.2	Vaihtoesteröinti .....	30
3.3.3	Anaerobinen hajoaminen .....	30
3.4	Mekaaniset jalosteet ja biomassan esikäsittely .....	31
3.5	Biojalostamoon integroitu CHP-tuotanto.....	33
4	Biojalostamo Hattulaan .....	34
4.1	Hämeen metsien tilanne .....	34
4.2	Hattulan Mervi biojalostamon sijaintina.....	35
4.2.1	Merven teollisuusalue .....	35
4.2.2	Kaukolämpö- ja maakaasuverkot.....	35
4.2.3	Kulkuyhteydet.....	35
4.3	Jalostamokonseptin reunaehdot .....	36
4.3.1	Kaukolämpö .....	36
4.3.2	Raaka-aineiden saatavuus .....	36
4.3.3	Biojalostamon halutut lopputuotteet .....	36
4.4	Vartenotettavat vaihtoehdot jalostamokonseptille .....	37
4.4.1	Kaasutus + metanointi + kaukolämpö.....	38
4.4.2	Torrefiointi .....	54
4.4.3	Pelletointi .....	62
4.5	Raaka-aineen kustannuksista .....	64
4.6	Biojalostamoprojektin läpivientiaikataulu .....	65
5	Tulevaisuuden näkökulmat .....	71
5.1	EU:n toimien vaikutus .....	71
5.1.1	ILUC .....	71
5.1.2	LULUCF .....	72

5.1.3	Bioenergian kestävyyskriteerit.....	72
5.1.4	Päästökauppa.....	73
5.2	Sähkön tuotantotuki voimalaitoksilla.....	73
5.3	SNG-kaasutuksen ja torrefioinnin kehitysnäkymät .....	74
5.4	Biojalostamon joustavuus ja laajennettavuus.....	75
6	Yhteenveto .....	77
	Lähteet.....	80

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
CO	Hiilimonoksidi
CHP	Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (Combined Heat and Power)
CH <sub>4</sub>	Metaani
IED	Teollisuuden päästädirektiivi (Industrial Emissions Directive)
EED	Energy Efficiency Directive, Energiatehokkuusdirektiivi
RES	Renewable Energy Sources directive, Uusiutuvien energialähteiden direktiivi
EJ	Eksajoule, 10 <sup>18</sup> J
kW	Kilowatti, 1000 W
kWh	Kilowattitunti 1000 Wh
TWh	Terawattitunti, 1 000 000 kWh
MW	Megawatti, 1000 kW
MW <sub>th</sub>	Megawatti lämpötehoa
MW <sub>sng</sub>	Megawatti SNG:n tuotantotehoa
SNG	Synteettinen biokaasu, bio-metaani, (Synthetic natural gas)
IGCC	Integrated gasification combined cycle, Kaasutukseen integroitu kombivoimalaitosprosessi
HRSG	Heat Recovery Steam Generator, ylijäämälämmön talteenottokattila
TOP	Torrefioitu pelletti
ECN	Energy research Centre of the Netherlands
CCS	Hiilidioksidin talteenotto, Carbon Capture and Storage
YVA	Ympäristövaikutusten arviointimenettely
VTT	Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus
BAT	Best Available Technology, Paras mahdollinen teknologia – päätelmä
Mtoe	Megatonni öljykvivalenttina
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
METLA	Metsäntutkimuslaitos
IEA	International Energy Agency
k-m <sup>3</sup>	kiintokuutiometri

# 1 JOHDANTO

Maailmanlaajuinen energiantuotanto perustuu tällä hetkellä paljolti fossiilisiin polttoaineisiin kuten öljy, maakaasu ja kivihiili. Näiden luonnonvarojen rajallisuus, sekä alati kasvava energian tarve tarkoittavat, että tulevaisuudessa fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi on löydettävä erilaisia energianlähteitä. Potentiaalisia korvaavia energianlähteitä ovat esimerkiksi aurinko-, tuuli- ja bioenergia, joita kutsutaan uusiutuviksi energianlähteiksi.

Ongelmana fossiilisten polttoaineiden käytössä ei ole ainoastaan niiden rajallinen saataavuus, vaan myös niiden aiheuttamat ympäristöhaitat. Fossiilisten polttoaineiden käytössä suurimmaksi huolenaiheeksi on noussut niiden poltossa vapautuva hiilidioksidi, jolla on todettu olevan vaikutus maapallon ilmaston lämpenemiseen eli niin kutsuttuun ”kasvihuoneilmiöön”. Fossiilisten polttoaineiden aikojen saatossa sitoma hiili vapautuu CO<sub>2</sub>-kaasuna ilmakehään ja estää näin lämpösäteilyn pääsyn avaruuteen.

Bioenergialla tarkoitetaan eloperäisestä biomassasta tuotettua energiaa. Biomassa sisältää hiiltä, joka myös poltettaessa vapautuu hiilidioksidina ilmakehään. Erona fossiilisten polttoaineiden polttoon on se, että poltossa vapautunut hiili on sitoutunut biomassaan sen elinkaaren aikana, joten sen vapauttaminen ilmakehään ei lisää ilmakehän hiilidioksidin kokonaismäärää. Tämän yhteydessä puhutaankin yleensä hiilidioksiditaseesta.

On selvää, että fossiilisten polttoaineiden korvaaminen muilla energiamuodoilla tulee olemaan erittäin haastava ja pitkäaikainen prosessi, ja että korvaavia energiamuotoja on useita yhden dominoivan sijaan. Uusiutuvan energian käytölle rajoituksia asettavat muun muassa alueelliset ja ilmastolliset eroavaisuudet. Aurinkoenergian laajamittaiselle käytölle on hyvät perusteet esimerkiksi päiväntasaajan lähetyvillä, mutta Suomen olosuhteissa aurinkoenergian hyödyntämiselle suuressa mittakaavassa sähköntuotannossa ei ole realistisia mahdollisuuksia johtuen pitkistä ja pimeistä talvista. Bioenergiasta erityisesti metsiin pohjautuva biomassa onkin ollut suuren kiinnostuksen kohteena viime aikoina erityisesti pohjoisissa runsaasti metsäpinta-alaa omaavissa maissa. Biomassapotentiaalin lisäksi pitkät perinteet ja tekninen osaaminen metsien hoitoon liittyen puoltavat tämän energiamuodon hyödyntämistä.

Sokeri- ja tärkkelyspitoisen biomassan hyödyntäminen on ollut arkipäivää jo usean vuosikymmenen ajan erityisesti liikennepolttoaineiden valmistuksessa. Esimerkiksi Brasili-



assa yli 90 prosenttia liikenteestä käyttää polttoaineenaan sokeriruo'osta valmistettua etanolia.[1] Tällaisia polttoaineita kutsutaan yleisesti ottaen ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiksi. Tämän kaltaisiin polttoaineisiin liittyy kuitenkin ongelmia. Polttoaineiden raaka-aineet ovat usein myös ruoaksi kelpaavia, josta aiheutuu nk. ”food vs. fuel” – konflikti. Myös laajamittainen öljykasvien viljely on johtanut mm. Malesiassa sademetsien hakkuuseen viljelymaiden tieltä, joka sotii suoraan biopolttoaineiden perus-ideaan vastaan, sillä tämä ei johda kestävä kehityksen mukaiseen biopolttoaineiden hyödyntämiseen. [2]

Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden tuotanto nähdäänkin hyvin rajallisena, ja pikemminkin siirtymäreittinä toisen sukupolven biopolttoaineisiin. Tällaisia ovat esimerkiksi jätteisiin ja syötäväksi kelpaamattomaan biomassaan perustuvat biopolttoaineet. Suomen metsien puuraaka-aineista valmistetut biopolttoaineet lukeutuvat tähän ryhmään. Toisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineille on esitetty kestävyyskriteerejä, jotka varmistavat, että biopolttoaineiden koko elinkaaren aikaiset haitat otetaan huomioon kestävä biopolttoaineiden tuotannon varmistamiseksi. Kestävyyskriteereistä on tarkempi selonteko luvussa 5.1.3.

Puupohjaisen biomassan valjastamiseksi energiantuotantoon on viime vuosikymmenet kehitetty erilaisia tekniikoita. Vaihtoehtoisia reittejä biomassan hyödyntämiseen on olemassa useita, joista osa on tällä hetkellä kaupallisella asteella, ja osa vielä kehityksen alla. Puupohjaista biomassaa hyödynnetään energiantuotannossa jo jonkin verran sekä itsenäisissä voimalaitoksissa, että metsäteollisuuden tuotantolaitoksiin integroiduissa voimalaitoksissa. Seuraava askel kohti puun hyötykäyttöä tulevat olemaan biojalostamot, joissa puuraaka-aineesta saadaan tuotettua, prosessista riippuen, monia eri jalosteita niin energia- kuin kemianteollisuudenkin käyttöön. Näihin prosesseihin palataan luvussa 3.

## 1.1 Työn tarkoitus

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutustua biojalostamo-konseptin tämän hetkiseen tilanteeseen sekä kartoittaa teknisiä mahdollisuuksia ja niiden soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Erityisen tarkastelun kohteena biojalostamon sijoituspaikaksi oli Hattulan Merven teollisuusalue. Työssä käytiin läpi kaksi erilaista jalostamon teknistä ratkaisumallia, joiden pohjalta muodostettiin käsitys Merveen soveltuvasta biojalostamokonseptista, sekä tehtiin karkeat arviot näiden konseptien kannattavuudesta. Lopuksi työssä arvioitiin myös tulevaisuuden näkymiä bioenergian ja biojalostamoiden kehityssuuntien, sekä mahdollisten poliittisten päätösten kannalta.

## 1.2 Työn sisältö

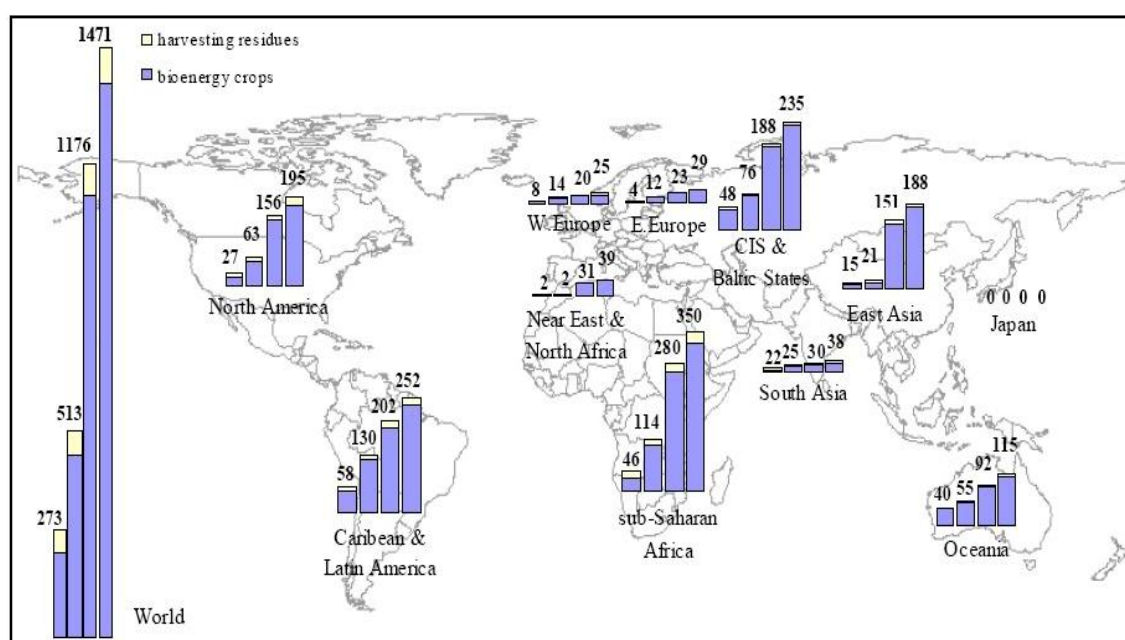
Tämä työ koostuu kolmesta kokonaisuudesta. Ensimmäinen osa (luvut 2. ja 3.) käsittelee bioenergian tilannetta ja roolia maailman, EU:n ja Suomen tasolla, sekä määrittelee biojalostamokonseptin ja tähän liittyvät tekniset prosessit yleisellä tasolla.

Toinen osa (luku 4.) sisältää Hattulan Merveen soveltuvien biojalostamokonseptien yksityiskohtaisemman selvityksen, mitoituksen sekä arviot näiden konseptien kannattavuudesta ja toteutettavuudesta.

Kolmas osa (luvut 5. ja 6.) käsittelee tulevaisuuden näkökulmia mm. EU:n toimien, biojalostemarkkinoiden sekä biojalostusteknologioiden kehityksen kannalta. Lopuksi luodaan yhteenveto läpi käydyistä biojalostamoprosesseista ja tehdään johtopäätökset työn tuloksista.

## 2 BIOENERGIA MAAILMASSA

Maailman primäärienergian kulutus oli vuonna 2011 12,2 miljardia öljykvivalenttitonnia joka vastaa noin 510 eksajoulea (EJ). Kasvua verrattuna vuoteen 2010 oli 2,5 %. Uusiutuvien energianlähteiden, pois lukien vesivoima, osuus tästä oli noin 50 EJ, eli noin 10 % kokonaiskulutuksesta. [3] Bioenergiaksi käytettävän biomassan kokonaispotentiaalin arviot vaihtelevat jonkun verran riippuen tutkimuksista. Arviot vaihtelevat 100 EJ:stä jopa 1500 EJ:een. Arvioihin vaikuttavat monet vaikeasti mitattavissa olevat seikat kuten bioenergian viljelyyn tarkoitettujen maa-alueiden hyödyntämisen realistiisuus niin poliittisessa kuin taloudellisessa mielessä. Yleinen ymmärrys tällä hetkellä kuitenkin on, että potentiaalista biomassaa olisi energiakäyttöön sovellettavissa noin 200 - 500 EJ, mikä vastaisi suurta osaa tämän päivän primäärienergian kulutuksesta. [4]



Kuva 1. Teknisesti mahdollinen bioenergiapotentiaali vuonna 2050 (EJ/a, 4 eri skenaariota vasemmalta oikealle) [A bottom up assessment of global bioenergy potentials to 2050] [5]

## 2.1 Tilanne EU:ssa

EU kulutti vuonna 2009 71 EJ:n edestä energiaa, josta se tuotti itse 48 prosenttia loppujen ollessa tuontienergiaa. [6] Vuonna 2010 uusiutuvien energianlähteiden osuus EU:n kokonaiskulutuksesta oli 12,5 prosenttia.[7] Biomassan osuus tästä määrästä oli 67,6 %, eli noin 6 EJ. Uusiutuvan energian tuotannon jakaantuminen eri maiden kesken on havaittavissa taulukossa 1.

	Primary production (1 000 toe)		Share of total, 2010 (%)				
	2000	2010	Solar energy	Biomass & waste	Geothermal energy	Hydropower energy	Wind energy
EU-27	96 650	166 647	2.2	67.6	3.5	18.9	7.7
Euro area	65 006	118 679	2.9	64.3	4.8	19.0	9.0
Belgium	534	1 989	3.0	89.8	0.2	1.4	5.6
Bulgaria	780	1 475	0.8	63.6	2.2	29.5	4.0
Czech Republic	1 339	2 900	2.1	88.6	0.0	8.3	1.0
Denmark	1 766	3 123	0.5	77.6	0.3	0.1	21.5
Germany	9 094	32 746	4.4	78.7	1.6	5.4	9.9
Estonia	512	988	0.0	97.3	0.0	0.2	2.4
Ireland	235	620	1.0	51.8	0.0	8.4	39.0
Greece	1 403	1 985	9.9	44.7	1.4	32.3	11.7
Spain	6 928	14 657	7.0	42.2	0.1	24.8	25.9
France	15 874	20 793	0.5	69.1	0.4	25.6	4.1
Italy	9 598	16 328	1.8	37.3	29.2	26.9	4.8
Cyprus	44	77	79.2	15.6	1.3	0.0	3.9
Latvia	1 393	2 101	0.0	85.4	0.0	14.4	0.2
Lithuania	682	1 185	0.0	94.0	0.4	3.9	1.6
Luxembourg	39	92	3.3	81.5	0.0	9.8	5.4
Hungary	830	1 922	0.3	91.4	5.2	0.8	2.4
Malta	0	0	-	-	-	0.0	0.0
Netherlands	1 347	2 896	1.0	86.6	0.3	0.3	11.8
Austria	6 608	8 600	2.0	57.1	0.4	38.4	2.1
Poland	3 808	6 849	0.0	94.0	0.2	3.7	2.1
Portugal	3 759	5 438	1.4	55.1	3.5	25.5	14.5
Romania	4 040	5 677	0.0	69.6	0.4	29.6	0.5
Slovenia	788	1 041	0.6	59.5	2.7	37.3	0.0
Slovakia	496	1 398	0.0	67.0	0.6	32.3	0.1
Finland	7 748	9 030	0.0	87.4	0.0	12.3	0.3
Sweden	14 741	17 408	0.1	65.4	0.0	32.8	1.7
United Kingdom	2 264	5 327	1.7	76.0	0.0	5.8	16.4
Norway	13 481	11 554	0.0	11.9	0.0	87.5	0.7
Switzerland	4 437	4 968	1.0	31.3	5.2	62.4	0.1
Croatia	879	1 232	0.4	39.9	0.6	58.1	1.0
FYR of Montenegro	322	422	0.0	47.6	2.8	49.5	0.0
Turkey	10 102	11 627	3.7	38.9	16.9	38.3	2.2

Taulukko 1. Uusiutuvan energian tuotanto EU-maissa. [Eurostat (online data codes: ten00081 and ten00082)] [8]

EU on asettanut jäsenmailleen niin kutsutut ”20-20-20” –energiatavoitteet RES-direktiivin muodossa. Direktiivin mukaan EU:n tulee vuoteen 2020 mennessä alentaa kasvihuonekaasu-päästöjään 20 prosentilla vuoden 1990 päästötasoista, lisätä uusiutuvan energian osuutta kokonaisenergiantuotannossa 20 prosenttiin nykyisestä 12,5 prosentista sekä parantaa energiankäytön tehokkuutta 20 prosentilla. Näiden lisäksi uusiutuvan energian osuus liikenteessä tulee olla 10 prosenttia. Näiden kokonaistavoitteiden saavuttamiseksi jokaisella EU-maalla on omat kansalliset tavoitteensa uusiutuvan energian käytön osalta johtuen käytettävissä olevan uusiutuvan energian potentiaalin eroista maiden kesken. Suomella uusiutuvan energian osuus energiantuotannosta tulee olla 38

prosenttia vuonna 2020, ja vastaavasti Ruotsilla 50 prosenttia johtuen mm. suuresta vesivoimapotentialista. [6]

Uusiutuvan energian käytön lisäksi RES -direktiivissä määritellään biopolttoaineille ja bionesteille kestävyyskriteerit, jotka varmistavat, että biopolttoaineiden koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset ovat kestävän biopolttoainetuotannon mukaiset. Näiden kriteerien implementointi EU:n jäsenvaltioiden lainsäädäntöön on tällä hetkellä osittain vielä kesken, jonka johdosta niitä käydään tarkemmin läpi tulevaisuuden näkymiin liittyvässä luvussa **5.1.3.**

Euroopan Unionin tulee liukuvana voimaan vuodesta 2016 eteenpäin myös erillinen teollisuuden päästädirektiivi IED (Industrial Emissions Directive), joka asettaa rajoituksia muille, kuin CO<sub>2</sub>-päästöille. Tämän direktiivin piiriin kuuluvat poltto- ja teollisuuslaitokset joiden nimellisteho on yli 50 MW. Direktiivin päästörajoitukset perustuvat BAT -päätelmiin, eli parhaan mahdollisen teknologian mahdollistamiin päästöarvoihin. Direktiivin ansiosta suuressa osassa vanhoista voimalaitoksista joudutaan tekemään suuria muutoksia päästöjen hillitsemiseksi. Mahdollisia muutoksia ovat mm. uuteen kattilatekniikkaan siirtyminen, savukaasunpuhdistuslaitteistojen asennus ja -päivitys sekä biopolttoaineiden käyttöönotto. [10]

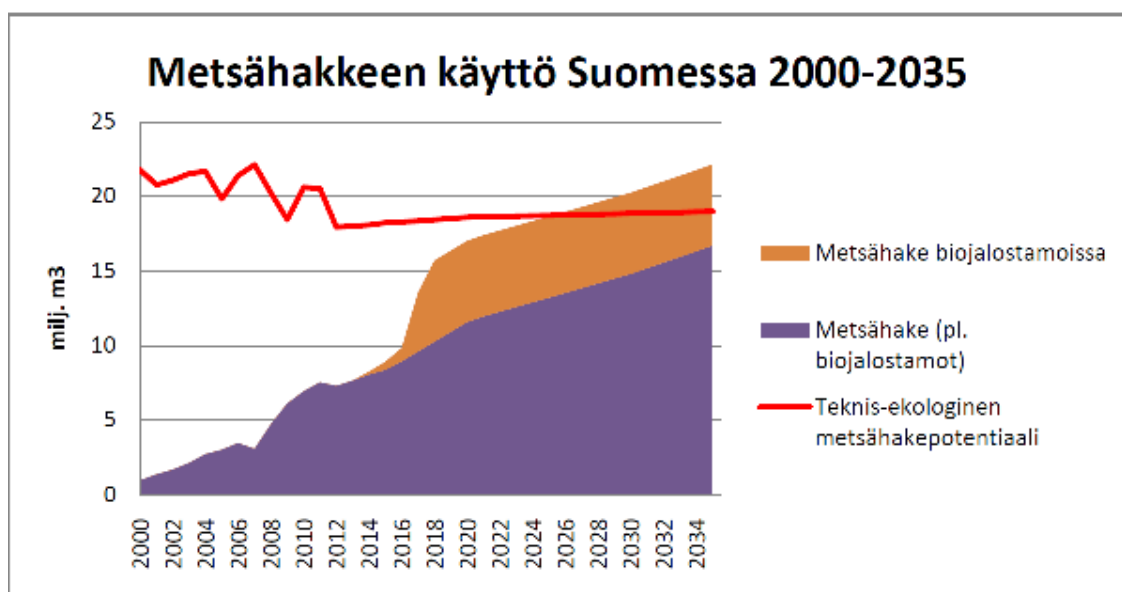
Edellä mainittujen direktiivien lisäksi EU:n alueella toimii päästökauppajärjestelmä, joka uudistui vuoden 2013 alussa. Järjestelmän tarkoituksena on rajoittaa kasvihuonekaasujen kokonaispäästö määrä EU:n tavoitteiden mukaiseksi. Tämän järjestelmän piiriin kuuluvat nimellisteholtaan yli 20 MW polttolaitokset sekä teollisuuden laitokset. Myös lentoliikenne liitettiin päästökaupan piiriin vuonna 2012. EU:n tasolla päästökauppasektori kattaa n. 45 prosenttia kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä. Päästökauppajärjestelmän perustana on Euroopan Komission säätämä kasvihuonekaasupäästöoikeuksien kokonaismäärä. Järjestelmän piiriin kuuluville laitoksille huutokaupataan noin puolet päästöoikeuksista, kun taas toinen puoli oikeuksista jaetaan ilmaiseksi esimerkiksi hiilivuotoaltille teollisuudenaloille. Suomessa kaukolämmöntuotannolle jaetaan ilmaiseksi noin puolet sen tarvitsemista päästöoikeuksista. [11]

RES-direktiivin energiatehokkuuden parantamisen varmistamiseksi on tullut 4.12.2012 voimaan oma direktiivinsä Energy Efficiency Directive (EED), jonka kansallinen täytäntöönpano tulee saada voimaan viimeistään 5.6.2014. Tämän energiatehokkuusdirektiivin piiriin kuuluvat kaikki energian loppukäyttäjät, jotka eivät kuulu päästökaupan piiriin, pois lukien liikenteen käyttämä energia. RES-direktiivin tavoitteiden mukaan primäärienergian kulutuksen vuonna 2020 tulee olla enintään 1474 Mtoe. Jotta tämä tavoite voidaan saavuttaa, on jokaisena vuonna direktiivin voimaantulosta saavutettava 1,5 % säästö kaikkien energian jakelijoiden ja vähittäismyyntiyritysten vuosittain loppukäyttäjille myymän energian määrästä. [16]

## 2.2 Suomen tilanne

Suomen kokonaisenergiantuotannosta on tällä hetkellä noin 30 prosenttia uusiutuvaa energiaa. Suomen itselleen asettama kansallinen tavoite uusiutuvien osuudelle vuonna 2020 on 38 prosenttia kokonaistuotannosta. Tämä tavoite on määrä saavuttaa tuuli-, aurinko- sekä bioenergian tuotannon lisäämisellä. Noin puolet tästä määrästä on tarkoitus saavuttaa lisäämällä metsäenergian käyttöä. Vuonna 2011 metsähaketta käytettiin sähkön- ja lämmöntuotannossa noin 6,8 miljoonaa kuutiometriä. Metsähakkeen käyttöä energiantuotannossa aiotaan lisätä 25 TWh:in vuoteen 2020 mennessä, mikä vastaa noin 13,5 miljoonaa kuutiometriä. Metsähakkeen käyttö tulisi siis lähes kaksinkertaistumaan. Pääasiassa käyttökohteet metsähakkeelle tulisivat olemaan poltto voimalaitosten monipolttoainekattiloissa, sekä jalostaminen uusiksi biopolttoaineiksi biojalostamoissa. [11]

Valtakunnan metsien investointitietojen mukaan energiapuun (energiarunko, oksat, juuret) suurin kestävä hakkuumäärä vuosina 2019 - 2038 olisi noin 26,5 miljoonaa kuutiometriä. Tämä määrä on lähes kaksinkertainen vuoden 2020 käyttötavoitteeseen verrattuna. [11]



Kuva 2. Metsähakkeen energiakäyttö Suomessa, miljoonaa m<sup>3</sup> [11]

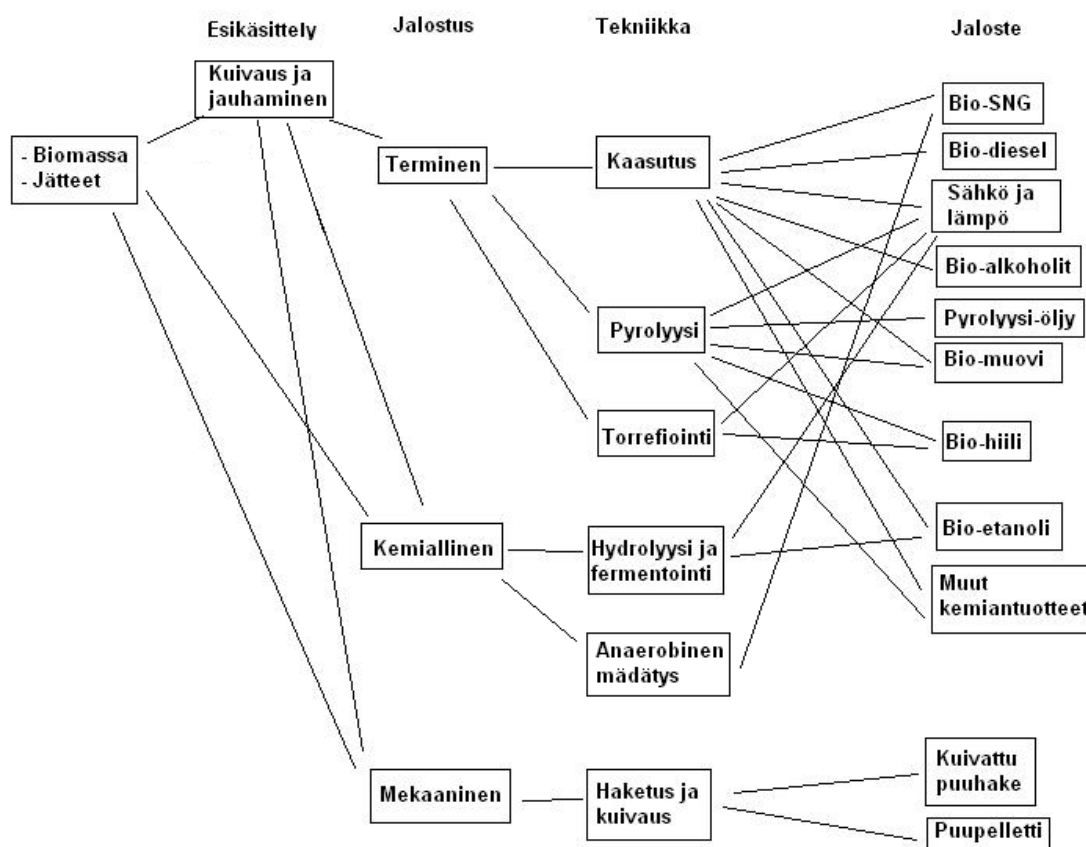
## 2.2.1 Bioenergian käyttökohteet ja tuet Suomessa

Suomessa on tällä hetkellä 7 suurta CHP-laitosta, joissa pölypolttokattiloiden polttoaineena käytetään kivihiiltä. Jotta kiristyyviin päästötavoitteisiin ja uusiutuvan energian lisäämisvelvotteisiin voidaan päästä, on kivihiilen käyttöä pystyttävä vähentämään ja korvaamaan uusiutuvilla polttoaineilla, kuten metsähakkeella. Metsähakkeen soveltuvuus sellaisenaan kivihiiltä raaka-aineenaan käyttäviin pölypolttokattiloihin aiheuttaa ongelmia muun muassa polttoaineen esikäsittelyssä, sillä haketta ei voida pienentää pölypolton vaatimaan raekokoon olemassa olevilla hiilimyllyillä. Niinpä kivihiilen käytön korvaamiseksi puubiomassalla on voimaloissa tehtävä suuria muutoksia puubiomassan polton mahdollistamiseksi. Vaihtoehtoinen reitti olisi pölypolttokattilaan soveltuvan puusta jalostetun polttoaineen käyttö. Torrefioitu puulastu tai pelletti soveltuisi tähän tarkoitukseen metsähaketta paremmin, jolloin korvattavan kivihiilen osuus voisi olla suuri, jopa yli 50 prosenttia. Torrefiointiin palataan tarkemmin luvussa 3.2.3 [12]

Ongelmana niin bioenergian kuin muunkin uusiutuvan energian käytön lisäämiselle on ollut näillä tuotetun energian hinta ja kilpailukyvyyn puute. Uusiutuvien energianlähteiden yleistymistä edistääkseen valtio myöntääkin tukia uusiutuvilla tuotetulle sähkölle ja lämmölle. Metsähaketta polttoaineenaan käyttävä sähköntuotantolaitos voi saada tuotantotukea päästöoikeuden hinnasta riippuen enintään 18 €/MWh. Sähköntuotantolaitos voi saada vaihtoehtoisesti myös kiinteää preemiotyylistä tuotantotukea, mikäli sen vuosituotanto ylittää 200 MWh sähkön markkinahinnan keskiarvon pysyessä alle 76,6 €/MWh.[14] 1.1.2013 alkaen CHP-laitoksen yhteyteen lisätylle metsähakkeen kaasuttimelle voidaan myöntää korotettu syöttötariffi.[13] Metsähakkeella tuotetulle lämmölle CHP-laitoksissa myönnetään 20 €/MWh suuruinen lämpöpreemio.[14] Tuotantotukien lisäksi valtio voi myöntää uuden teknologian laitoksille ja uusiutuvaa energiaa hyödyntäville laitoksille investointitukia, joiden suuruus riippuu hankkeen tyypistä, koosta, teknologiatasosta ja kannattavuudesta. Muun muassa biomassaa edelleen biopolttoaineiksi jalostavat biojalostamot voivat saada uuden teknologian investointitukia. [11]

### 3 BIOJALOSTAMON MAHDOLLISUUDET

Biojalostamon perusajatus on samantyyppinen kuin öljynjalostamolla. Öljynjalostamolla voidaan jalostaa raaka-öljystä monia erilaisia tuotteita voiteluaineista moottoribensiiniin ja dieseliin. Biojalostamon suurin ero öljynjalostamosta tulee sen käyttämistä raaka-aineista, eli biomassasta, joka voi olla esimerkiksi puuta, jätettä tai peltobiomassaa. Esimerkiksi energiapuusta on mahdollista jalostaa eri menetelmillä biodieseliä, biokaasua, joka tunnetaan myös nimellä bio-SNG, bioetanolia, biohiiltä jne. Mahdollisia jalosteita on suuri määrä, ja ne jaetaan yleensä tuotantotekniikan mukaan joko termokemialisiin, biokemialisiin tai mekaanisiin jalosteisiin. Kuvassa 4 on hyvin yksinkertaistettu havaintokuva biojalostamon mahdollisista prosessireiteistä.



Kuva 3. Biojalostamoprosessin periaatekuva.



Kuvassa 3 näytetyt prosessit on koottu yhteen mahdollisten prosessireittien havainnollistamiseksi. Todellisuudessa kaikkia mainittuja prosesseja tuskin tullaan näkemään samassa jalostamossa jo kustannussyistä, vaan järkevämpää on todennäköisesti valmistaa yhtä tai kahta jalostetta siten, että prosesseissa syntyvä lämpö käytetään mahdollisimman täydellisesti hyödyksi kuivureissa, kaukolämmön tuotannossa tai muussa lämmön hyötykäytössä. Tällä tavalla raaka-aineiden energiasisältö saadaan talteen mahdollisimman hyvin, joka vaikuttaa myönteisellä tavalla jalostamon kokonaishyötysuhteeseen.

### 3.1 Edellytykset biojalostamon toiminnalle

Biojalostamon toiminnan mahdollistaminen riippuu monesta tekijästä. Tällä hetkellä kyse on pitkälti uusista teknologioista, joista ei ole vielä kunnollisia käyttökokemuksia maailmalla, jonka johdosta teknologiat herättävät vielä epävarmuutta erityisesti toimintavarmuuden suhteen.. Investoinnin suuruusluokka, sekä epävarmuudet sen kannattavuudesta luovat lisäksi omat paineensa biojalostamohankkeeseen ryhtymiselle. Näin ollen teknologian tulee osoittaa riittävä kypsyys, ennen kuin suuren kokoluokan biojalostamohankkeeseen kannattaa ryhtyä. Biojalostamon kustannuksiin ja kannattavuuteen palataan tarkemmin luvussa 4.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia metsäenergian hyödyntämistä biojalostamon raaka-aineena, joten raaka-aineesta puhuttaessa tarkoitetaan pääasiassa metsästä saatavaa energiapuuta sekä *energiakuitupuuta*. [15]

Biojalostamo tarvitsee toimiakseen suuren määrän raaka-ainetta. Jalostusprosessit ovat yleensä jatkuvasti toimivia, joka edellyttää raaka-aineen saannin osalta hyvää huoltovarmuutta. Tämä puolestaan tarkoittaa riittävää kapasiteettia esikäsittelyvaiheelta sekä raaka-aineen toimitusketjulta. Käytännössä raaka-aineelle on oltava jalostamon läheisyydessä riittävä puskurivarasto, joka on käytettävissä, mikäli raaka-aineen toimitusketjussa tai esikäsittelyssä, eli haketuksessa ja kuivauksessa ilmenee ongelmia. Raaka-aineen esikäsittelyn yksityiskohtiin palataan tarkemmin luvussa 3.4. [15]

Biojalostamo asettaa myös sijainnilleen vaatimuksia. Kustannussyistä ei ole järkevää kuljettaa raaka-aineita tai valmiita jalosteita pitkiä matkoja, vaan jalostamo olisi pyrittävä rakentamaan mahdollisimman keskeiselle alueelle raaka-aineiden ja jalosteiden loppukäyttäjien sijainnin kannalta. Kuljetusyhteyksien tulee olla riittävät kapasiteetiltaan. Mikäli biojalostamon vuotuinen puunkäyttö olisi 1 TWh, tarkoittaa tämä raaka-ainepuun kuljetuksen määrässä noin 30:tä tukkirekkalastillista jalostamolle vuoden jokaisena päivänä. Vastaavasti jalosteiden kuljetus pois jalostamolta vaatii riittävän kuljetuskapasiteetin, mahdollisesti rautatie- tai vesiyhteyden. [15]

Alueellisia vaatimuksia on myös. Riippuen teknisestä prosessista, jalostamo tarvitsee toimiakseen vettä kohtalaisen määrän. Tässä tapauksessa vesistön läheisyys voi olla tarpeen. Jalostamon toiminnasta voi aiheutua melu- ja pölyhaittoja jalostamon tyypistä riippuen, joten asutuksen läheisyys ei ole välttämättä suotavaa. Riittävän purku-, lastaus- ja varastointikapasiteetin vuoksi jalostamo tarvitsee usean hehtaarin asfaltoidun alueen. [15]

Edelleen prosessista riippuen, biojalostamossa syntyy varsinaisten jalosteiden ohella lämpöä. Lämpö voidaan hyödyntää osittain kaukolämpönä, jolloin kaukolämpöverkoston läheisyydestä on hyötyä. Lämmöstä voidaan tehdä sähköä höyryturbiinilla, jolloin tarvitaan sähköverkkoliitintään liittyvä teknologia. Lämmölle voi löytyä myös muita käyttäjiä, mikäli sijaintipaikan lähellä on höyryä käyttävää teollisuutta. Tämä on järkevää ottaa huomioon jalostamon sijaintipaikkaa valitessa. Mikäli jalostamossa on tarkoitus valmistaa biokaasua, on olemassa olevan maakaasuverkoston läheisyydestä hyötyä kaasun siirron kannalta.

## 3.2 Termokemialliset jalostustekniikat

Kuten aiemmin on mainittu, biojalostustekniikat jaetaan usein kolmeen eri ryhmään. Termokemiallisilla jalostustekniikoilla tarkoitetaan sellaisia prosesseja, joissa biomasan jalostus tapahtuu lämpöenergian myötävaikutuksesta. Tällaiset tekniikat puolestaan erotetaan toisistaan pääasiassa prosessissa reagoivan hapen määrän mukaan. Palamisesta puhuttaessa reaktion oletetaan tapahtuvan stökiömetrisessä tilassa, eli polton happikertoimen ollessa 1. Tällöin polttoaine palaa täydellisesti, eli happea on juuri polttoaineen palamiseen tarvittava määrä. Termokemiallisissa jalostusprosesseissa happikerroin on alle yhden, eli palaminen tapahtuu alistökiömetrisessä tilassa. Happikertoimen ollessa noin 0,25 - 0,5 puhutaan polttoaineen kaasutuksesta. Happikertoimen ollessa 0 tai lähes 0, puhutaan pyrolyysireaktiosta, jolloin varsinaista palamista ei tapahdu. Tällöin prosessin tarvitsema lämpö tuodaan siihen muilla keinoilla. Torrefioinnissa toimitaan niin ikään hapettomassa tilassa, mutta pyrolyysiin verrattuna pienemmässä lämpötilassa. Tämän luvun tarkoitus on esitellä kyseiset prosessit sekä näiden sisältämät tekniset mahdollisuudet ja haasteet. [17]

### 3.2.1 Kaasutus

Kaasutuksella tarkoitetaan prosessia, jossa kiinteä tai nestemäinen polttoaine muutetaan kaasumaiseen muotoon korkean lämpötilan avulla. Kaasutusprosessi koostuu useasta vaiheesta, jotka saattavat polttoaineen partikkelikoosta riippuen olla osin päällekkäisiä. Ensimmäinen vaihe on polttoaineen lämpeneminen ja kuivuminen, jonka jälkeen tapah-

tuu pyrolyysi. Pyrolyysissä osa polttoaineen kiinteistä aineista muuttuu kaasu- ja tervamaiseen muotoon, joita kutsutaan yleisesti haihtuviksi aineiksi. Pyrolyysistä jäljelle jää jäännöshiili, joka tämän jälkeen lämmön tuonnin vaikutuksesta joko kaasuuntuu tai palaa hapen määrästä riippuen. [18] Kaasutusprosesseja on maailmalla käytössä sekä kehitysasteella monenlaisia, ja tämän luvun tarkoituksena on tuoda esiin eri kaasutintyyppien toimintaperiaate, niiden vahvuudet ja heikkoudet sekä tekniikoiden jaottelutavat. Lisäksi käydään läpi kaasuttimesta saatavan kaasun jälkikäsittelymahdollisuudet ja kaasunpuhdistus.

### **3.2.1.1 Kaasuttimen lämpötilataso**

Kaasutintekniikat voidaan jakaa niissä käytetyn lämpötilan mukaan matalan ja korkean lämpötilan kaasuttimiin. Korkean lämpötilan kaasuttimien toimintalämpötila on noin 1300 – 1500 °C, kun taas matalan lämpötilan kaasuttimessa toimintalämpötila on noin 850 °C. Jaottelu toimintalämpötilan mukaan on järkevää siksi, että kaasutuksen lopputuloksena saatavan kaasun kemiallinen koostumus riippuu merkittävästi käytettävästä lämpötilatasosta. Korkean lämpötilan kaasuttimesta saatava kaasu, josta käytetään nimeä synteesikaasu, sisältää pääasiassa hiilimonoksidia sekä vetyä, kun taas matalan lämpötilan kaasuttimesta saatava kaasu sisältää vedyn ja hiilimonoksidin lisäksi lukuisia hiilivety-yhdisteitä, kuten metaania ja etyleeniä sekä erilaisia tervoja. Tällaisesta kaasusta käytetään nimeä tuotekaasu. Kaasuttimen lämpötilatason valintaan vaikuttavat kaasuttimen rakenteen lisäksi siis haluttu jalostustuote. Mikäli kaasun jatkojalostaminen tapahtuu esimerkiksi biodieseliksi Fischer-Tropsch –menetelmällä, on tällöin haluttu kaasutuksen lopputuote synteesikaasu, sillä ainoastaan CO ja H<sub>2</sub> voidaan hyödyntää jatkojalostusvaiheessa. [19]

### **3.2.1.2 Kaasuttimen painetaso**

Kaasuttimet voidaan jaotella myös käytetyn painetason mukaan atmosfäärisiin ja paineistettuihin kaasuttimiin. Näistä on olemassa monenlaisia eri variaatioita. Kaasuttimen painetasolla on jonkun verran merkitystä kaasutusprosessin hyötysuhteeseen ja saadun kaasun koostumukseen, mutta tämän lisäksi kaasun paineistuksella on merkitystä kaasutusreaktorin jälkeisessä prosessissa. Jatkojalostustavasta riippuen prosessit voivat vaatia tuote- tai synteesikaasun paineistuksen, jolloin paineistetulla kaasutuksella saavutetaan etuja. Paineistettu kaasutus asettaa lisävaatimuksia ja mahdollisesti lisäkustannuksia rakenteille verrattuna normaalipaineiseen laitteistoon. Paineistetut leijukerroskaasuttimet biomassan kaasutusta varten ovat tällä hetkellä kehitysasteella. [24]

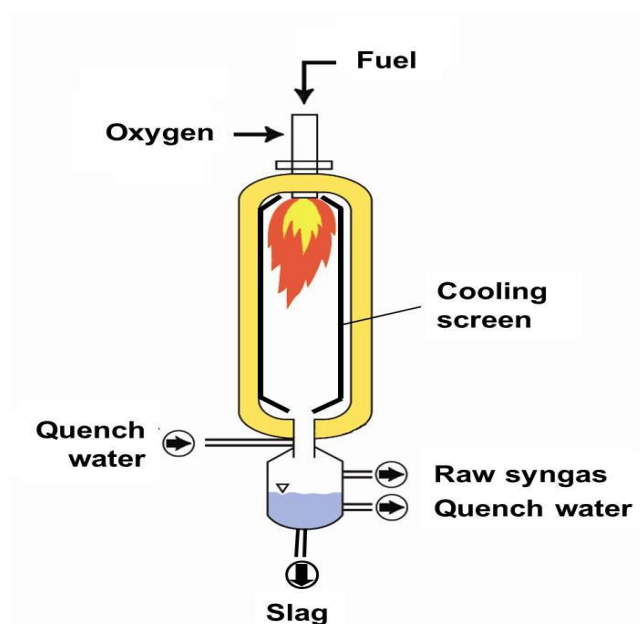
### 3.2.1.3 Kaasutuksen väliaine

Kaasutuksessa saavutettavaan kaasun koostumukseen voidaan vaikuttaa lämpötilatason lisäksi myös kaasutuksen väliaineella. Kaikki tällä hetkellä kaupallisella tasolla olevat kaasuttimet käyttävät väliaineena ilmaa. Ilmasta 78 prosenttia on typpeä, joka tarkoittaa, että kaasutuksesta saatavassa kaasussa on myös paljon typpeä (vähintään 38 %). Kaasun jalostustavasta riippuen tämä voi olla haluttu, tai ei-haluttu seuraamus. Tällä hetkellä kehitteillä olevissa kaasuttimissa ilma on korvattu hapella tai vesihöyryllä, tai näiden yhdistelmällä. Tällaisessa kaasuttimessa typen määrä kaasussa jää hyvin pieneksi, josta on hyötyä kaasua jatkojalostettaessa. Vesihöyryä kaasutusväliaineena käytettäessä syntyvä kaasu sisältää paljon hiilimonoksidia ja metaania. Tämä on etu, mikäli kaasusta on tarkoitus jalostaa bio-SNG:tä. Myös hiilidioksidia ja metallioksideja on tutkittu kaasutusväliaineena ilman korvaajana. [17]

### 3.2.1.4 Erilaiset kaasuttimet

#### *Pölykaasutin*

Kaasuttimia on rakenteensa puolesta olemassa kolmea päätyyppiä. Yleisin synteetikaasun valmistuksessa käytetty kaasutin on rakenteeltaan pölykaasutin, joka on ollut jo pitkään kaupallisessa käytössä hiilen kaasutuksessa. Pölykaasuttimessa polttoaine syötetään erittäin hienojakoisena reaktorin polttimeen kaasutusväliaineen kanssa, jossa polttoaine kaasuuntuu erittäin korkeassa (1300 – 1700 °C) lämpötilassa. Väliaineena voidaan käyttää ilmaa tai happea halutusta lämpötilatasosta riippuen. Tällaisessa pölykaasuttimessa polttoaineen konversio kaasuksi on täydellinen, eli puhutaan täyskaasutuksesta. Kaasutusreaktiossa syntyy erittäin puhdasta synteetikaasua, ja tervanmuodostukselta välttyään, jolloin kaasunpuhdistus helpottuu. Tällöin kuitenkin sulan tuhkan erotukselle synteetikaasusta tarvitaan oma tekniikkansa. Rakenteensa vuoksi tällainen kaasutin ei ole taloudellisesti järkevä ratkaisu pienessä kokoluokassa. Pölykaasuttimia löytyy kaupallisella tasolla kivihiilikäytössä useilta valmistajilta, mm. Siemensiltä ja Shelliltä. Pölykaasutin sopii erittäin hyvin kivihiilelle, mutta biomassan käytön suhteen ongelmia aiheuttaa biomassan jauhaminen ja syöttö kaasutusreaktoriin. Polttoaineen rae-koon tulee olla pientä, jolloin biomassan jauhaminen muodostuu hankalaksi ja kuluttaa paljon energiaa. Mahdollinen ratkaisu tähän voi olla esimerkiksi biomassan torrefiointi ennen kaasutusta, jolloin biomassan jauhaminen helpottuisi. Tällaista konseptia ei ole kuitenkaan tiedettävästi vielä testattu. [19] [20] [21]



Kuva 4. Pölykaasuttimen periaatekuva [22]

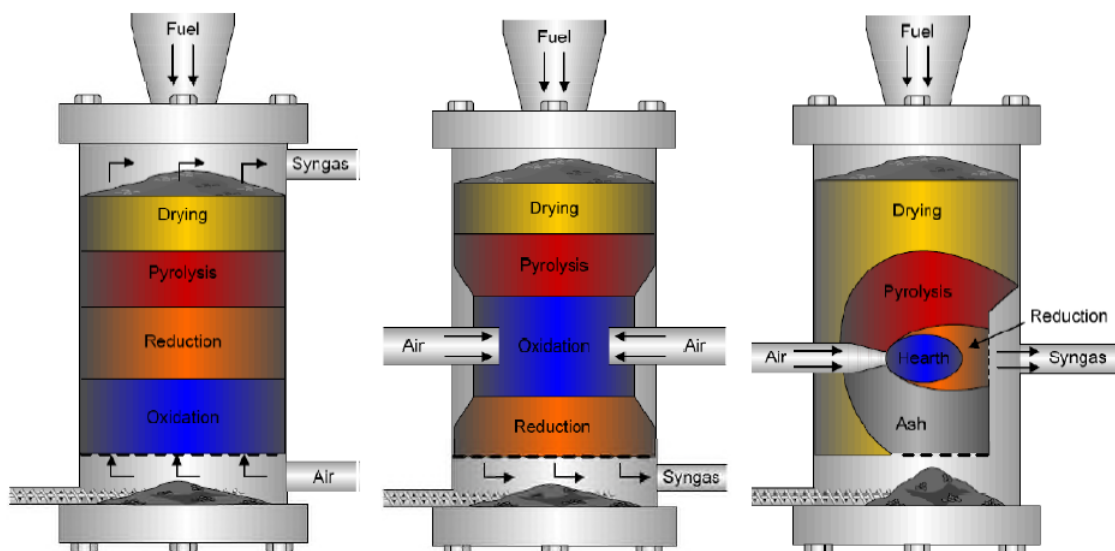
### Kiinteäkerroskaasutin

Toinen kaasutintyyppi on kiinteäkerroskaasutin. Kiinteäkerroskaasuttimet toimivat yleensä matalassa lämpötilassa ja ne voidaan jakaa rakenteensa puolesta myötävirta-, vastavirta-, ja ristivirtakaasuttimiin.. Kaasuttimet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, ja näin ollen edullisia ja ne soveltuvat käytettäväksi myös biomassan kanssa, lukuun ottamatta ristivirtakaasutinta. Kiinteäkerroskaasuttimien nimet muodostuvat sen mukaan, kulkeeko polttoaine kaasuvirran kanssa samaan suuntaan, eri suuntaan tai ristiin (kuva 5). Polttoaine syötetään tavallisesti reaktorin yläosaan josta se valuu alaspäin käyden läpi kaasutuksen eri vaiheet. Myötävirtakaasuttimessa saatava tuotekaasu otetaan talteen reaktorin alaosasta, kun taas vastavirtakaasuttimessa reaktorin yläosasta. Erona näillä kaasutintyypeillä on myös kaasutusilman tai hapen syöttökohta. Myötävirtakaasutin sopii hyvin pien-CHP -tuotantoon, suhteellisen puhtaan tuotekaasun, sekä kustannustensa puolesta. Polttoaineen laatu- ja kosteusvaatimukset ovat puolestaan tiukat käytön jatkuvatoimisuuden varmistamiseksi. Tällaisessa kaasuttimessa polttoaineen konversio ei ole täydellinen, eli kyseessä on osakaasutus. Tästä johtuen tuhkaa muodostuu paljon ja tuhkan seassa on myös jonkun verran jäännöshiiltä. Myötävirtakaasutin ei myöskään sovellu isoon yli 1 MW<sub>th</sub> kokoluokkaan johtuen mm. kaasutusilman epätasaisesta leviämisestä kaasutuspedin koon kasvaessa. Vastavirtakaasutin puolestaan soveltuu isoonkin kokoluokkaan, eivätkä polttoaineen koko- ja kosteusvaatimukset ole yhtä tiukat kuin myötävirtakaasuttimessa. Polttoaineen konversio kaasuksi voi olla tällaisessa kaasuttimessa täydellinen. Ongelmia aiheuttaa puolestaan kaasuttimessa tapahtuva ter-

vanmuodostus, joka asettaa haasteita tervan reformoinnille ja kaasun puhdistukselle. [19] [20] [21]

Sekä myötä- että vastavirtakaasuttimet ovat yleensä matalan lämpötilan kaasuttimia, mikä tarkoittaa sitä, että kaasutusprosessissa tuhka ei sula. Molemmissa kaasuttimissa kaasutuksen väliaineena toimii yleensä ilma. Kaasuttimissa puhtaan hapen käyttö kaasutusväliaineena aiheuttaa ongelmia, mikäli lämpötilataso halutaan pitää alhaisena tuhkan sulamisen estämiseksi. Täten kaasutin ei sovellu esimerkiksi typettömän tuotekaasun tuottoon. On olemassa myös sulan tuhkan poistoon kehitettyjä prosesseja, joissa hapen käyttö kaasutusväliaineena on mahdollista. [19] [20] [21]

Ristivirtakaasuttimen ominaisuudet ovat samankaltaiset kuin myötävirtakaasuttimen, mutta sen lämpötilataso on korkeampi. Ristivirtakaasuttimen polttoainevaatimukset ovat tiukat, ja sen käyttö tapahtuukin yleensä kivihieilellä. Ristivirtakaasuttimia ei ole yleisesti käytetty, koska muut kiinteäkerroskaasutintyytit tarjoavat paremman polttoainejoustavuuden ja toimintakyvyn. [23]



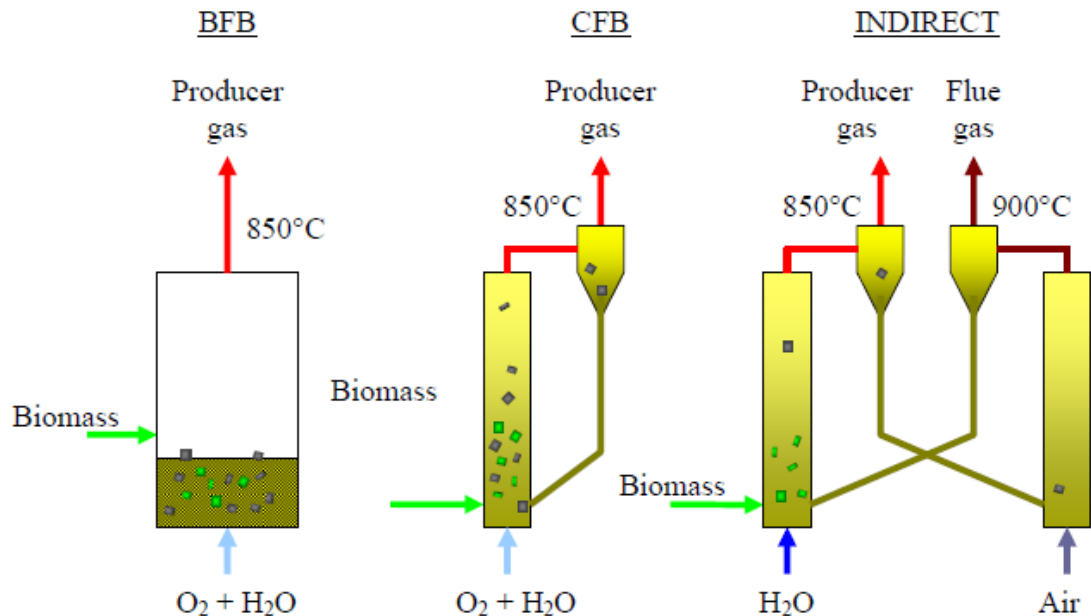
Kuva 5. Vasemmalla vastavirtakaasutin, keskellä myötävirtakaasutin ja oikealla risti-virtakaasutin [20]

### ***Leijukerroskaasutin***

Kolmas ja biomassan käytön kannalta kiinnostavin kaasutintyyppi on leijukerroskaasutin. Tässä kaasutintyyppissä polttoaine kaasutetaan fluidimaisessa leijukerroksessa. Leijumateriaali on yleensä hiekkaa tai mahdollisesti katalyyttisesti aktiivista materiaalia, kuten oliviiniä tai dolomiittiä. Katalyyttisesti aktiivisen leijumateriaalin käytöllä pyritään vähentämään tervojen syntymistä kaasutuksessa. Leijukerroksen etuja ovat polttoaineen tasaisempi jakautuminen, tehokkaampi lämmönsiirto polttoaineeseen. Leijukerrosessa vallitseva lämpötila kyetään pitämään paremmin kurissa ja lämpötilapiikkien

(hot spot) muodostuminen voidaan estää. Leijukerroskaasuttimet voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin:

- Kupliva leijukerroskaasutin (BFB, bubbling fluidized bed gasifier)
- Kiertoleijukerroskaasutin (CFB, circulating fluidized bed gasifier)
- Epäsuora / alloterminen kaasutin (Indirect / allothermal gasifier) [19]



Kuva 6. Leijukerroskaasuttimien periaatekuvat. [19]

BFB kaasuttimessa polttoaine syötetään leijukerrokseen tai sen yläpuolelle. Reaktorin pohjalla sijaitsevista suuttimista syötetään kaasutusväliainetta (ilmaa, happea/höyryä tai hiilidioksidia) joka yhdessä leijumateriaalin kanssa muodostaa kuplivan leijukerroksen. Kaasutusaineen ansiosta osa kerrokseen syötetystä polttoaineesta palaa, jolloin muodostuu kaasutukseen tarvittava määrä lämpöenergiaa. Saatava tuotekaasu poistuu reaktorin yläosasta. BFB reaktorissa kaasun virtausnopeus on noin 1 m/s, ja reaktorin koko on yleensä alle  $10 \text{ MW}_{th}$ . [19]

CFB kaasuttimessa polttoaineen ja kaasutusaineen syöttö tapahtuu kuten BFB kaasuttimessa, mutta kaasun virtausnopeus on suurempi, noin 3-10 m/s. Tämän ansiosta leijumateriaali ja osa jäännöshiilestä lähtevät kaasuvirtauksen mukaan, jolloin ne on erotettava tuotekaasusta ja kierrätettävä takaisin leijukerrokseen. Tällainen erotus tapahtuu esimerkiksi syklonin avulla. Sekä BFB, että CFB kaasuttimet sopivat hyvin biomassan kaasutukseen. [19]

BFB ja CFB kaasuttimet ovat suoria kaasuttimia, joka tarkoittaa, että kaasutusreaktion vaatima lämpö saadaan aikaan polttamalla leijukerroksessa osa kaasutettavasta polttoaineesta. Kolmas leijukerroskaasutintyyppi on epäsuora kaasutin, myös kaksoispetikaasuttimena tunnettu, jossa kaasutukseen vaadittava lämpö tuodaan reaktoriin sen ulko-

puolelta. Kaasutuskerroksessa ei siis tapahdu palamista, vaan kyse on enemmänkin korkean lämpötilan pyrolyysistä. Epäsuorassa kaasuttimessa on tavallisesti kaksi eri reaktoria, kaasutusreaktori ja polttoreaktori. Kaasutusreaktorissa kaasutettava polttoaine pyrolysoituu kaasuiksi ja jäännöshiileksi matalassa lämpötilassa (850 °C), jonka jälkeen kaasuvirta poistuu reaktorista. Reaktorin jälkeen kiinteät aineet, jäännöshiili ja leijumateriaali, erotetaan kaasuvirtauksesta ja johdetaan polttoreaktoriin, jossa jäännöshiili, sekä osa muodostuneista tervoista ja pölystä, poltetaan. Poltossa saatu lämpöenergia siirtyy leijumateriaaliin, joka edelleen johdetaan takaisin kaasutusreaktoriin. Poltossa syntyneet savukaasut puhdistetaan ja poistetaan ilmakehään. Kaasutusreaktori voi olla rakenteeltaan esimerkiksi leijukerroskaasutin, mutta myös muunlaisia reaktoreja on olemassa. Kaasutusväliaineena käytetään vesihöyryä. Epäsuoran kaasutuksen etuina ovat tuotetun kaasun erittäin pieni typpipitoisuus, josta on hyötyä tuotekaasun jalostuksen kannalta, sekä parempi hyötysuhde johtuen polttoaineen täydellisestä konversiosta. Höyryä kaasutusväliaineena käytettäessä kaasutuksessa syntyy paljon metaania, josta on erityistä hyötyä, mikäli haluttu jalostuksen lopputuote on synteettinen maakaasu. [19]

### 3.2.1.5 Matalan lämpötilan kaasuttimien yleiset ongelmat

Vaikka kaasutustekniikka on kehittynyt viime vuosina huomattavasti, ongelmia on edelleen ratkottava, jotta tekniikoiden laajamittainen kaupallistuminen on mahdollista. Suurimmat ongelmat aiheutuvat kaasutuksessa syntyvistä tervoista, joita muodostuu matalissa, alle 900 °C lämpötiloissa. Tervat tukkivat helposti kaasutusreaktorin jälkeisiä komponentteja kaasun jäähtyessä, jolloin tervayhdisteet kondensoituvat. Toisaalta taas kaasutuslämpötila on pidettävä alle 900 °C, jotta vältetään polttoaineen tuhkan sulamiselta, joka voi johtaa tuhkan kasaantumiseen esimerkiksi kaasunpuhdistuslaitteiston katalyytteihin. Tuhka voi myös sintrautua leijupetimateriaalin kanssa muodostaen kaasautumia, mikäli lämpötila pääsee nousemaan liian korkeaksi leijukerroksessa. Tuhkan sulamiseen vaikuttaa lämpötilan ohella myös kaasutettavan biomassan koostumus, erityisesti sen alkalipitoisuus. Tästä johtuen niin kaasutusolosuhteiden, kuin kaasutettavan biomassan laadun tulisi vaihdella mahdollisimman vähän ongelmien välttämiseksi. [19]

Happea tai höyryä käyttävät kaasuttimet ovat rakenteeltaan erittäin monimutkaisia. Mikäli kaasutusaineena halutaan käyttää ilman sijasta puhdasta happea, sen erotukseen ilmasta tarvitaan oma yksikkönsä, joka aiheuttaa suuren lisän investointikustannuksiin. Investointikustannusten lisäksi hapen erotus kuluttaa paljon sähköenergiaa, joka huonontaa laitoksen kokonaishyötysuhdetta. Hapen varastointiin ja tuotantoon liittyy myös turvallisuusseikkoja. Toisaalta taas happea käytettäessä kaasutusprosessin läpi kulkeva tilavuusvirta pienenee merkittävästi, joka tarkoittaa säästöjä koko kaasutusprosessin laitteiston koossa, sekä mahdollisessa kaasun paineistuksessa tapahtuvassa sähkönkulutuksessa. Nämä säästöt konkretisoituvat laitokseen kasvaessa. Tuotekaasun lämpöarvo



on myös ilmakaasutuksella saavutettua parempi. Puhtaan hapen tai höyryn käyttö kaasutusväliaineena on tarpeen, mikäli kaasun typpipitoisuus halutaan minimoida. [17]

### 3.2.1.6 Kaasun puhdistus ja jälkikäsittely

Biomassan kaasutuksessa syntyy yleensä halutun synteesi- tai tuotekaasun lisäksi myös muita yhdisteitä. Näistä yhdisteistä eniten ongelmia aiheuttavat tervat, jotka pilaavat ja tukkivat kaasuttimen jälkeisiä kaasunpuhdistuslaitteita. Tervojen määrän minimoimiseksi ensisijaiset keinot ovat lämpötilan tarkka valvonta kaasutusprosessissa, sekä leijukerroskaasuttimessa katalyyttisesti aktiivisen petimateriaalin valinta. Hyviksi vaihtoehtoisiksi ovat osoittautuneet dolomiitti ja oliviini. Tervojen muodostuminen kaasutuksessa vähenee merkittävästi yli 800 °C lämpötiloissa. Korkean lämpötilan kaasuttimissa tervojen muodostuminen on erittäin vähäistä. [19]

Tervojen poisto kaasuttimen jälkeen tapahtuu tervojen reformointiprosessilla. Reformointiprosesseja on kehitteillä erilaisia, joista yleisimmät ovat lämpöreformointi sekä katalyyttinen reformointi. Lämpöreformoinnissa tuotekaasun lämpötilaa nostetaan yli 1200 °C asteeseen, jolloin raskaat hiilivedyt, sekä metaani hajoavat. Tämä menetelmä on huono prosessin hyötysuhteen kannalta lisääntyvän lämmöntarpeen johdosta. Myös kaasun lämpöarvo alenee metaanin hajotessa. Paljon tutkittu ja kehitetty reformointitapa on katalyyttinen reformointi. Katalyyttisessä reformoinnissa tuotekaasun tervat hajotetaan katalyyttien avulla vedyksi ja hiilimonoksidiksi reaktioyhtälön 1 mukaisesti:



Yleisimmin käytetty katalyytti on nikkeli, mutta myös jalometallikatalyyttejä on tutkittu paljon mm. VTT:n toimesta. [24] Katalyyttien suurin ongelma on niiden tukkeutuminen ja toiminnan heikentyminen. Ne tulisivatkin olla helposti vaihdettavissa, jolloin katalyyttimateriaalin tulisi olla myös halpaa. Yksi tutkittu reformointitapa on käyttää reformointikatalyyttinä epäsuorassa kaasutuksessa syntyvää jäännöshiiltä. Tällä menetelmällä on saavutettu kokeissa hyviä tuloksia. [19]

Tervojen lisäksi tuotekaasu sisältää pieniä määriä muita yhdisteitä, jotka on puhdistettava suodattamalla ne esimerkiksi vesi- tai öljypesurien avulla. Puhdistuksen taso riippuu kaasun käyttökohteesta. Mikäli tuotettava kaasu on tarkoitus muuttaa esim. Fischer-Tropsch –synteessillä biodieseliksi, ovat kaasun puhtausvaatimukset huomattavasti tiukemmat kuin sähköntuotantoon sopivalla polttokaasulla. Kaasujen joukosta puhdistettavia aineita tervojen lisäksi ovat sulfidit, ammoniakki, vetysyanidi, alkalit sekä pölypartikkelit. [17]

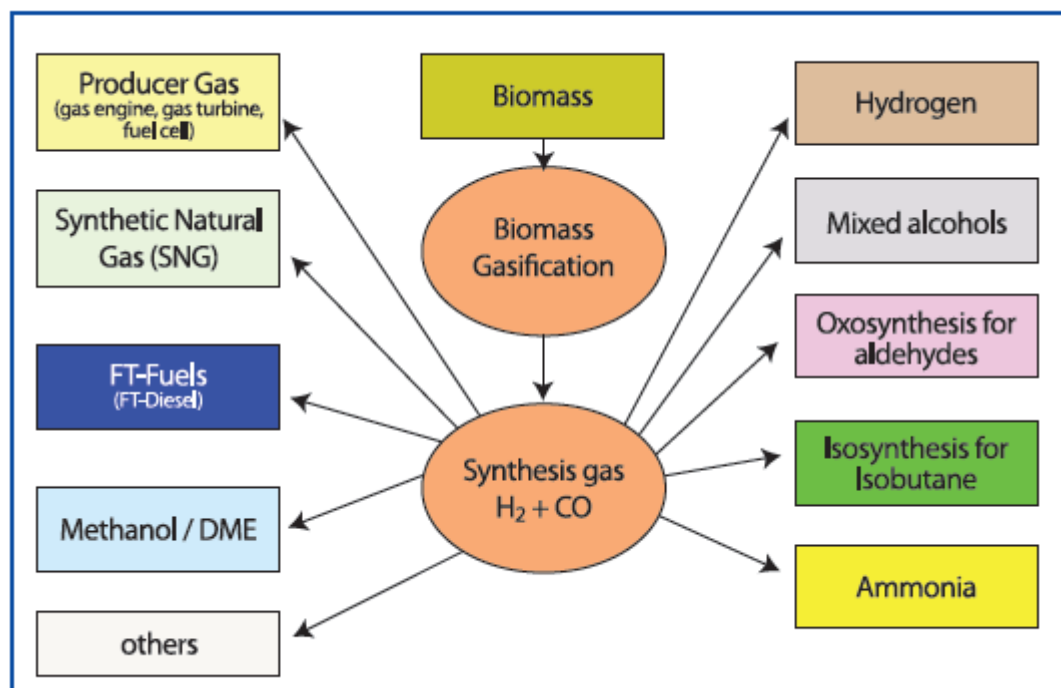
Kaasun reformointiin kuuluu tervojen poisto lisäksi olennaisena osana myös kaasun vety/hiilimonoksidi ( $\text{H}_2/\text{CO}$ )-suhteen muunto jatkojalostuksen kannalta optimiin. Tämä riippuu jälleen jatkojalostustavasta. Biomassan kaasuttimesta saatavan tuotekaasun  $\text{H}_2/\text{CO}$  -suhde on yleensä noin 0.8-1.6 luokkaa. Esimerkiksi Fischer-Tropsch-synteesiin vaadittava  $\text{H}_2/\text{CO}$ -suhde on tavallisesti yli 2, joten vedyn osuutta kaasussa tulee lisätä. Tämä tapahtuu vesikaasu-reaktion avulla shift-yksikössä, jossa hiilimonoksidi ja vesi-höyry reagoivat muodostaen vetyä ja hiilidioksidia reaktioyhtälön 2 mukaisesti:



[17], [24]

### 3.2.1.7 Erilaiset jalosteet

Kuten edellisissä luvuissa kävi selväksi, on synteesi- tai tuotekaasusta mahdollista jalostaa monia eri lopputuotteita. Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi muutaman tärkeän jalosteen asettamat vaatimukset jalostusprosessille. Käytävien prosessien lisäksi synteesikaasulle on olemassa lukuisia muita jatkojalostusreittejä, joita ei tässä työssä käydä tarkemmin läpi.



Kuva 7. Mahdollisia jalosteita synteesikaasusta. [70]

### ***Bio-SNG***

Bio-SNG, eli synteettinen maakaasu on käytännössä yli 90 prosenttisesti metaania. Tästä johtuen jo kaasuttimesta lähtien on prosessin hyötysuhteen kannalta edullista, että kaasutuksessa syntyy paljon metaania. Kaasutuksessa mukana oleva typpi laimentaa tuotekaasun lämpöarvoa, eikä sen olemassaolo ole haluttua SNG:n tuotannossa. Näin ollen tarkoitukseen sopiva kaasutin käyttää kaasutusväliaineena happea ja/tai höyryä. Kaasuttimen jälkeinen tuotekaasun puhdistus on toteutettava nostamatta lämpötilaa liian korkeaksi, jolloin terminen reformointi ei tule kysymykseen. Kaasunpuhdistuksen jälkeen tuotekaasussa oleva vety ja hiilimonoksidi halutaan muuntaa metaaniksi, jota varten tarvitaan metanointiyksikkö. Metanoinnin jälkeen saatu kaasu voidaan muuntaa maakaasua vastaavaksi erottamalla siitä hiilidioksidi ja vesi. Tässä vaiheessa kaasua voidaan kutsua SNG:ksi, jolloin se voidaan paineistaa, ja siirtää vaikkapa maakaasuputkeen. [19]

### ***Fischer-Tropsch***

Fischer-Tropsch-synteesissä reagoivat aineet ovat vety ja hiilimonoksidi. Nämä reagoivat prosessin lämpötilasta riippuen erilaisiksi hiilivedyiksi ja vedeksi. Metaani ei reagoi prosessissa, joten sen syntymistä halutaan välttää jo kaasutuksesta lähtien. Kaasutuksen osalta kyseeseen voisi tulla matalan tai korkean lämpötilan kaasutin ilma- tai happipuhallettuna. Myös yhdistelmä matalan ja korkean lämpötilan kaasuttimista on kehitetty saksalaisen Choren:n toimesta. Tämä kaasutustekniikka kulkee nimellä Carbo-V, ja se soveltuu Fischer-Tropsch-synteesikaasun tuotantoon erinomaisesti. Fischer-Tropsch-synteesi on katalyyttinen prosessi, jonka johdosta synteesikaasun puhdistus ennen reaktoria on erittäin tärkeää. Fischer-Tropsch-synteesin mahdollisia lopputuotteita ovat prosessiolosuhteista ja käytetyistä katalyyteistä riippuen mm. kevyet hiilivedyt, diesel sekä erilaiset vahat, joista voidaan edelleen jalostaa esimerkiksi liikennepolttoaineita. [17], [25]

### ***Metanoli/DME***

Vetyä, hiilimonoksidia ja hiilidioksidia sisältävää synteesikaasua voidaan käyttää Fischer-Tropsch-synteesin ohella myös metanolin tuotantoon metanolisynteesin avulla. Vaatimukset synteesikaasun koostumukselle ovat samanlaiset Fischer-Tropsch-synteesin kanssa. Metanolisynteesi on niin ikään katalyyttinen prosessi, jossa vety, hii-

limonoksidi, ja hiilidioksidi reagoivat matalassa lämpötilassa (220-300 °C) ja korkeassa paineessa (50-100 bar) katalyyttien johdosta muodostaen metanolia ja vettä. [26] Metanolisynteesiin lisättyllä dehydraatiolla ja vesikaasu-reaktiolla voidaan metanolista tuottaa edelleen dimetyylieetteriä (DME), joka nähdään erittäin potentiaalisena liikennepolttoaineena tulevaisuudessa. Tästä prosessista käytetään nimeä DME-synteesi. [27]

### 3.2.2 Pyrolyysi

Pyrolyysillä tarkoitetaan kiinteän aineen muuttumista kaasuihin ja tervamaiseen muotoon lämmöntuonnin vaikutuksesta. Pyrolyysireaktio on läsnä aina lämpötilan noustessa polttoaineessa riittävästi riippumatta siitä, onko reaktioympäristössä happea vai ei. Pyrolyysistä jäljelle jäävää osuutta kutsutaan jäännöshiileksi, ja polttoaineen ollessa puuta tästä jäljelle jäävästä osuudesta käytetään nimitystä puuhiili. Puun tapauksessa pyrolyysi alkaa noin 200 °C ja se on voimakkaimmillaan noin 350 °C. Pyrolyysin aikana kaasumaiseen muotoon muuttuvista aineista käytetään yhteisnimitystä haihtuvat aineet. Pyrolyysin aikana haihtuvien aineiden määrään vaikuttavat polttoaineen laatu, pyrolyysissä käytettävä lämpötilataso sekä polttoaineen varsinainen pyrolyysinopeus ja viipymäaika. Polttoaineen pyrolyysinopeuteen puolestaan vaikuttaa lämmöntuonnin intensiteetin lisäksi myös polttoaineen palakoko. Suurilla partikkeleilla pyrolyysin nopeutta rajoittaa lämmönsiirto ympäristöstä polttoaineeseen sekä aineensiirto polttoaineesta ympäristöön. Pienillä hiukkasilla vastaavasti pyrolyysinopeutta rajoittaa kemiallinen kinetiikka. Puun pyrolyysissä noin 80 prosenttia sen massasta kaasuuntuu käytettäessä hidasta lämpöä nopeutta noin 900 °C asteeseen asti. [18]

Pyrolyysi on paljon tutkittu termokemiallinen biomassan jalostustekniikka. Pyrolyysireaktio on endoterminen, jonka johdosta reaktion aikaansaamiseksi tarvittava lämpö on tuotava prosessiin ulkopuolelta. Pyrolyysistä saadaan pääsääntöisesti kahta eri lopputuotetta, haihtuvien aineiden muodostamaa kaasua, sekä puuhiiltä. Näiden saantojen suhde riippuu prosessiolosuhteista. Suurin osa haihtuvista aineista voidaan lauhduttaa takaisin nesteeksi, jota kutsutaan pyrolyysiöljyksi. Pyrolyysiöljyllä on edelleen monia jatkojalostusmahdollisuuksia. Puuhiili voidaan jatkojalostaa moneen eri käyttöön, tai se voidaan polttaa sellaisenaan pyrolyysireaktion vaatiman lämmön aikaansaamiseksi. Haihtuvien aineiden kaasuista osa on kondensoitumattomia, jotka voidaan myös polttaa pyrolyysireaktion vaatiman lämmön aikaansaamiseksi. [28]

Pyrolyysitekniikoita on olemassa useita erilaisia, ja yleinen tapa jaotella nämä on prosessin lämmöntuonnin nopeuden mukaan nopeaan ja hitaaseen pyrolyysiin. Edellisessä osiossa esitellyssä epäsuorassa kaasutuksessa on kyse myös eräänlaisesta pyrolyysireaktiosta, joten täydellistä erottelua kaasutuksen ja pyrolyysin välillä jalostustekniikkana ei

ole tarpeen tehdä. Kehitteillä olevat tekniikat liikkuvatkin pyrolyysin ja kaasutuksen välimaastossa. [28]

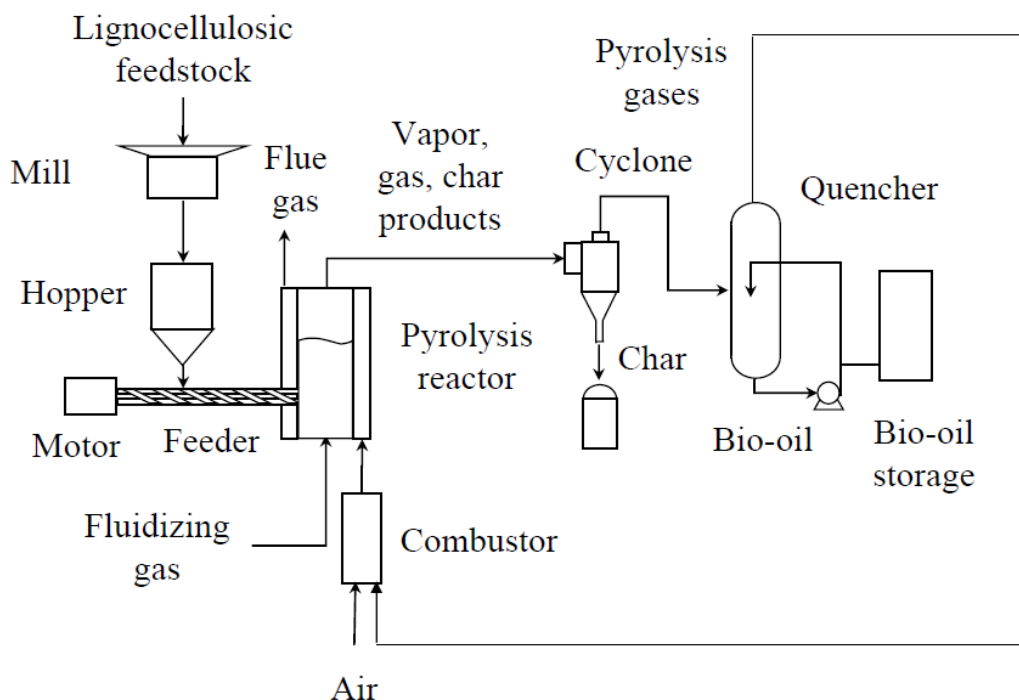
Tämän osion tarkoituksena on luoda käsitys pyrolyysistä jalostustekniikkana sekä selvittää prosessin pääkohdat ja loppujalosteiden ominaisuudet, joten eri pyrolyysitekniikoiden syvällisempää tarkastelua ei tehdä.

### 3.2.2.1 Nopea pyrolyysi

Nopeassa pyrolyysissä pienet ( $>3\text{mm}$ ) polttoainepartikkelit kuumennetaan nopeasti noin  $400 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan. Viipymisaika reaktiossa on lyhyt, noin  $0.5 - 2$  sekuntia. Saatava pyrolyysikaasu jäähdytetään ja lauhdutetaan nopeasti pyrolyysinesteeksi. Prosessista saatava pyrolyysiöljyn osuus on noin  $60 - 70\%$  polttoaineen massasta. Nopean pyrolyysin etuja ovat suuri saanto-prosentti sekä operointi ilmakehänpaineessa ja suhteellisen matalissa lämpötiloissa. Menetelmän huonot puolet liittyvät syntyvän pyrolyysiöljyn koostumukseen, eritoten suureen happi- ja vesipitoisuuteen. Nopean pyrolyysin reaktortyyppinä on olemassa monenlaisia. [28]

Alapuolella on periaatekuva kuplivaan leijukerrosprosessiin perustuvasta nopeasta pyrolyysiprosessista. Kuvan prosessin kulku:

- Biomassa jauhetaan ensin hienoksi, jonka jälkeen se syötetään pyrolyysireaktoriin.
- Pyrolyysireaktiossa syntyy kaasuja sekä jäännöshiiltä jotka erotetaan toisistaan syklonilla.
- Jäännöshiili ohjataan polttokammioon/jalostettavaksi.
- Pyrolyysikaasut ohjataan lauhduttimeen jossa ne muuttuvat nesteeksi.
- Lauhtumattomat kaasut ohjataan polttokammioon, josta lämpö siirtyy pyrolyysi-reaktoriin.



Kuva 8. Nopean pyrolyysin prosessikuvaus. [28]

### 3.2.2.2 Hidas pyrolyysi

Hitaassa pyrolyysissä polttoaine lämmitetään hitaasti hapettomassa tilassa noin 400 - 500 °C asteeseen. Polttoaineen viipymäaika pyrolyysireaktiossa voi olla muutamasta minuutista useisiin tunteihin riippuen lämmitysnopeudesta ja polttoaineen palakoosta. Hidas pyrolyysi ei ole yhtä kriittinen polttoaineen palakoolle kuin nopea pyrolyysi. Tässä prosessissa syntyvien haihtuvien aineiden osuus on pienempi kuin nopeassa pyrolyysissä. Puuhiili on prosessista saatava päätuote ja sen saanto on noin 30 – 40 prosenttia polttoainepuun massasta. Hidas pyrolyysi tapahtuu hiiltoretorteissa, joissa puupolttoaine lämmitetään epäsuorasti savukaasujen avulla. Savukaasut saadaan aikaan polttamalla puuta sekä hiillossa muodostuvia kondensoitumattomia kaasuja ja höyryjä. Hidasta pyrolyysiä on perinteisesti käytetty grillihiilten valmistamiseen ja kyseessä onkin erittäin vanha tekniikka. Perinteisessä menetelmässä prosessista otetaan talteen ainoastaan puuhiili, mutta nykyään prosessista saadaan talteen myös pyrolyysikaasut ja tisle, jotka voidaan jatkojalostaa edelleen. [29], [30]

### 3.2.2.3 Pyrolyysiöljy

Pyrolyysiöljyksi kutsutaan niitä nesteitä, jotka kondensoituvat pyrolyysireaktion kaasuista. Näille öljyille ominaista on korkea happi- sekä vesipitoisuus, jotka heikentävät niiden lämpöarvoa. Pyrolyysiöljyn lämpöarvo onkin noin puolet raskasöljyn lämpöarvosta. Pyrolyysiöljyt sisältävät myös happamia aineita, jotka aiheuttavat metallien kor-

roosiota. Tästä johtuen pyrolyysiöljyn käyttö ja varastointi on tehtävä hyödyntäen ruostumattomia materiaaleja. Tämä tarkoittaa materiaalien osalta lisäkustannuksia. [31]

Yksi pyrolyysi- tai bio-öljyn potentiaalisimmista käyttökohteista ovat raskasta tai kevyttä polttoöljyä käyttävät varavoimalaitokset. Fossiilisen polttoöljyn korvaamisella bio-öljyllä saavutettaisiin merkittäviä vähennyksiä voimalaitoksen päästöissä. Bio-öljyn käyttö varavoimalaitoksissa asettaa erityisvaatimuksia öljyn varastoinnille, sekä poltto-laitteiden materiaaleille.

### 3.2.2.4 Puuhiili tai biohiili

Pyrolyysireaktiosta saatavan puuhiilen lämpöarvo on noin 30 MJ/kg riippuen pyrolyysin lämpötilasta. Puuhiilellä voidaan korvata poltossa kivihiiltä, jonka energiasisältö on noin 15 - 30 MJ/kg. Puuhiilen energiasisältö voi olla kivihiiltä korkeampi, koska puuhiili sisältää vähemmän tuhkaa. Puuhiilellä on käyttökohteita voimalaitoksen polttoainekäytön lisäksi myös terästeollisuudessa koksen korvikkeena sekä mm. maanparannushii- lenä. Sekä torrefioinnin kautta saatua hiiltä, että korkeammassa lämpötilassa pyrolysoi- tua puuhiiltä nimitetään yleisesti biohiiliksi. Erona näillä on pyrolyysiprosessissa käy- tetty lämpötila, joka on torrefioinnissa alle 300 °C. Korkeammassa lämpötilassa pyroly- soituneen biohiilen suhteellinen hiilipitoisuus on suurempi, josta aiheutuu myös sen suurempi lämpöarvo. Biohiilen saanto pyrolyysiprosessista pienenee sen energiasisällön kasvaessa. Tämä puolestaan aiheutuu pyrolyysin lämpötilatason ja pyrolysointiajan kas- vusta. Näin ollen biohiilen ominaisuuksia voidaan säätää halutunlaisiksi. [32]

### 3.2.3 Torrefiointi

Torrefioinnilla tarkoitetaan matalassa lämpötilassa tapahtuvaa pyrolyysireaktiota, jonka tarkoituksena on muuttaa puun rakennetta ja ominaisuuksia paremmin polttoainekäyt- töön sopivaksi. Torrefioinnin lopputuotetta kutsutaan yleisesti biohiileksi, joskin sen koostumus eroaa hieman edellisen luvun pyrolyysillä aikaansaadusta puuhiilestä. Torre- fioinnin aikana vain osa täydellisessä pyrolyysissä kaasuuntuvista aineista kaasuuntuu, jonka johdosta torrefioidussa biohiilessä on haihtuvia orgaanisia aineita läsnä enemmän kuin täydellisellä pyrolyysillä valmistetussa puuhiilessä. Mitä korkeammassa lämpöti- lassa pyrolyysi tapahtuu, sitä pienempi on biohiilen saanto, ja saadun hiilen lämpöarvo vastaavasti suurempi. Taulukkoon 2 on koottu puun, biohiilten sekä fossiilisen hiilen lämpöarvot vertailun vuoksi. [33]

	Käsittelylämpötila (°C)	Lämpöarvo (MJ/kg)
Käsittelemätön puu		18
Torrefioitu puu	230	18,5
	250	19
	280	22
Puuhiili	> 300	28–33
Hiili		15–31

*Taulukko 2. Biohiilen ja fossiilisen hiilen lämpöarvoja. [32]*

Biohiilien ensisijaisena käyttökohteena nähdään kivihiilen korvaaminen rinnakkaispoltoilla kivihiilivoimalaitoksissa. Maailman kivihiilivoimaloista 90 prosenttia käyttää poltoteknikkana pölypolttokattiloita, lopun 10 prosentin ollessa leijupetikattiloita. Jotta kivihiiltä voitaisiin suoraan korvata näissä voimaloissa ilman niihin tehtäviä suuria teknisiä muutoksia, on korvaavan polttoaineen vastattava mahdollisimman hyvin ominaisuuksiltaan kivihiiltä. Tärkeimpinä ominaisuuksina voidaan pitää polttoaineen energiatihelyttä, polttoaineen jauhautuvuutta erityisesti pölypolttokattiloiden olemassa olevien hiilimyllyjen käyttöä silmälläpitäen, sekä polttoaineen koostumusta polttoa ajatellen. Näiden kriteerien valossa torrefioitu puu pärjää erinomaisesti. [33]

### 3.2.3.1 Torrefioinnin vaiheet

Torrefiointiprosessi voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen seuraavalla tavalla:

- Ensimmäisessä vaiheessa polttoaine lämmitetään pisteeseen, jossa vesi alkaa haihtua.
- Toinen vaihe on esikuivaus joka alkaa silloin, kun vesi alkaa haihtua polttoaineesta. Tämän vaiheen aikana polttoaineen kosteus laskee lineaarisesti lämpötilan pysyessä vakiona. Tämä vaihe jatkuu kunnes polttoaineen kosteuspitoisuus saavuttaa kriittisen pisteen. Tämän jälkeen kosteuden täytyy haihtuakseen tunkeutua materiaalin läpi, joka vaatii enemmän aikaa ja lämpöenergiaa.
- Jälkikuivatus- ja keskitason lämmitysvaihe alkaa kun lähes kaikki massaan sitoutunut vesi on haihtunut. Tässä vaiheessa polttoaineen lämpötila alkaa jälleen nousta lämmön tuonnista johtuen, ja osa kiinteistä yhdisteistä alkaa kaasuuntua. Tämä vaihe kestää siihen asti, kunnes polttoaine saavuttaa 200 °C lämpötilan.
- Tämän jälkeen alkaa varsinainen torrefiointivaihe, johon kuuluu jäähdytys ja lämmitys. Lämpötila nousee 300 °C asti, jonka aikana tapahtuu pyrolyyttistä hajoamista, jonka seurauksena kiinteitä yhdisteitä haihtuu ja polttoaineen massa pienenee. Polttoaineen lämpötila pysyy huippulämpötilassa hetken ajan proses-



siyksityiskohdista riippuen, jonka jälkeen lämpötila alkaa laskea. Kun polttoaine jälleen saavuttaa 200 °C lämpötilan, torrefiointivaiheen katsotaan loppuneen.

- Viimeinen vaihe on polttoaineen lämpötilan laskeminen jatkokäsittelyn kannalta haluttuun arvoon edelleen hapettomassa tilassa johtuen syttymis- ja räjähdysvaarasta. [33]

Koko edellä kuvattu prosessi tapahtuu inerteissa olosuhteissa polttoaineen ja hapen reagoimisen estämiseksi. Varsinaisessa torrefiointivaiheessa kaasuuntuvat kiinteät yhdisteet voidaan polttaa prosessin vaatiman lämmön aikaansaamiseksi, jolloin prosessi voisi teoriassa olla autoterminen, eli energian suhteen omavarainen. Vaihtoehtoisesti lämpö voidaan tuoda prosessiin myös ulkopuolelta esimerkiksi maakaasua polttamalla, mikäli lämmön tarve on suurempi kuin poltettavista torrefiointikaasuista saatava energiasisältö. [33]

### 3.2.3.2 Torrefioidun puun ominaisuudet

Torrefioinnin aikana puubiomassaa lämmitetään vaiheittain hapettomassa tilassa noin 300 °C, jonka aikana puusta haihtuu suurin osa vedestä, sekä pieni määrä kiinteitä aineita. Torrefioinnin seurauksena 30 prosenttia puun alkuperäisestä massasta haihtuu, energiasisällön pienentyessä 10 prosentilla. Suurin osa haihtuvasta massasta on vettä, joten torrefioinnin ansiosta puun lämpöarvo kasvaa noin 30 prosenttia suhteessa massaan, ja näin ollen sen energiatiheys nousee kivihiilen tasolle. [33]

Ehkä tärkein torrefioidun puun ominaisuus on parantunut jauhautuvuus johtuen puun molekyyliarakenteen muutoksista torrefioinnin johdosta. Lämpötilan noustessa yli 200 °C, jossa torrefiointi-reaktion katsotaan alkavan, puun rakenne alkaa muuttua hemiselloosan, selluloosan sekä ligniinin hajotessa. Lämpötilatason ollessa rajoitettu 300 °C:een, suurin osa pyrolyyttisestä hajoamisesta tapahtuu hemiselluloosalla. Hajoamisen tuloksena syntyviä aineita ovat mm. vesi, CO, CO<sub>2</sub> sekä metanoli. Hemiselluloosa, selluloosa sekä ligniini saavat aikaan puun sitkeän rakenteen, ja niiden osittaisen hajoamisen myötä torrefioidun puun rakenne on jauhautuvuuden osalta hyvin samankaltainen kivihiilen kanssa. Tämän myötä torrefioidun puun jauhaminen onnistuu kivihiilivoimailojen olemassa olevilla hiilimyllyillä, jolloin lisäinvestointien tarve uusiin jauhamismenetelmiin ja biomassan käsittelyyn liittyvään laitteistoon poistuu. [17], [33]

Puun rakennemuutosten myötä torrefioidun puun hydrofobisuus kasvaa, jolloin sen vettä hylkivät ominaisuudet paranevat. Tämä tarkoittaa helpompaa varastointia ja logistiikkaa, ja esimerkiksi torrefioidun puun ulkovarastointi on mahdollista. Torrefioitu materiaali suojautuu käsittelemätöntä biomassaa paremmin biologiselta hajoamiselta kasvaneen hydrofobisuuden johdosta. Logistiset ominaisuudet paranevat kasvaneen energiatheyden johdosta. Torrefioidun puun kuljetuskustannukset ovatkin suhteessa pienemmät

käsitlemättömän biomassan kuljetuskustannuksiin verrattuna. Torrefioitu puu on mahdollista pelletöidä tai briketöidä energiatiiuviden parantamiseksi, jolloin polttoaineen varastointi ja kuljetus on yhä helpompaa ja kustannustehokkaampaa. Torrefioidusta pelletistä käytetään nimitystä TOP-pelletti. [33], [34]

Torrefioidun puun poltto-ominaisuudet ovat kivihiilen kaltaiset, jolloin rinnakkaispolton määrää voidaan kasvattaa huomattavasti suuremmaksi verrattuna käsitlemättömän biomassan rinnakkaispoltoon. Torrefioitua puuta käytettäessä korvausosuus voi olla jopa 50 prosenttia, kun taas tavallisella puulla osuus rajoittuu 15 – 20 prosenttiin. [33], [34]

### 3.2.3.3 Torrefiointin tilanne ja tekniikat

Torrefiointia on viime aikoina tutkittu paljon, ja erilaisia torrefiointitekniikoita demonstroivia laitoksia on käytössä jonkin verran. Esimerkiksi Hollannissa on käyttöön otettu vuonna 2012 ECN:n ja Andritz:n torrefiointiteknologiaa demonstroiva laitos, jonka tuotantokapasiteetti on 60 000 t/a. [33], [35]

Torrefiointiprosessin vaiheet ovat eri tekniikoista huolimatta pääpiirteittäin samat, ja suurimmat erot eri valmistajien tekniikoiden välillä ovat torrefiointireaktoreissa, joita on monenlaisia. Näissä mm. polttoaineen viipymäaika reaktorissa, sekä lämpötila- ja painetasot vaihtelevat. Teknologioiden ollessa tässä vaiheessa melko tuoreita, eri menetelmien edut ja haitat eivät ole vielä täysin selvillä, josta johtuen vertailu eri menetelmien kesken on hankalaa. Torrefiointireaktorit voivat olla rakenteeltaan esimerkiksi rumpu- tai ruuvityyppisiä, sekä muunlaisella liikkuvalla pedillä varustettuja kuivureihin perustuvia reaktoreita. [33]

Paitsi torrefiointitekniikka, myös biomassan koostumus, sekä sen palakoko vaikuttavat torrefiointiprosessin kulkuun ja lopputuotteiden laatuun suuresti. Esimerkiksi eri puulajien hemiselluloosan koostumus vaihtelee, joten myös torrefiointiprosessiolosuhteet täytyy optimoida käytetyn biomassan mukaan, joka voi vaikuttaa myös torrefiointireaktorin suunnitteluparametreihin. Näin ollen torrefiointireaktorin valintaan vaikuttaa suuresti käytettävän biomassan laatu. [17], [33]

Torrefiointiprosessi on ideaalitalanteessa autoterminen, eli torrefiointireaktiossa vapautuvat haihtuvat aineet poltetaan prosessissa tarvittavan lämmön aikaansaamiseksi. Tämä lämpö voidaan puolestaan tuoda prosessiin joko suoraan kierrätettyjen torrefiointikaasujen välityksellä, tai epäsuorasti lämmönvaihtimien ja lämmönsiirron väliaineen, kuten höyryn, avustuksella. Tämä onkin yleisin jaotteluperiaate eri torrefiointireaktorioiden välillä. Torrefiointikaasujen poltosta saatavaa lämpöenergiaa voidaan hyödyntää reaktion ylläpitämisen ohella myös mm. polttoaineen kuivauksessa. [33]

### 3.2.3.4 Torrefioinnin haasteet

Torrefioinnin suurimmat haasteet eivät tule olemaan teknologian toimivuudessa, vaan sen kannattavuudessa. Torrefioinnin kannattavuus riippuu sekä prosessin kokonaishyötysuhteesta, että raaka-ainepuun ja torrefioidun puun tai pelletin välisestä hinta-erosta markkinoilla. Ongelmana tällä hetkellä on, että torrefioiduille lopputuotteille ei ole vielä olemassa markkinoita, ja on epäselvää, miten markkinat tulevat jatkossa kehittymään. Tähän puolestaan vaikuttavat useat seikan kuten epävarmuus torrefiointiteknologian toimivuudesta ja lopputuotteiden laadusta, energiapoliittinen lainsäädäntö, päästöjen vähentämiseen liittyvät uusiutuvan energian tuet, yleinen talouden tilanne maailmassa jne. [36]

Torrefiointiprosessit tulee optimoida niin, että saavutettu lopputuote on tasalaatuista, ja täyttää tulevat torrefioidun polttoaineen standardit. Tällä tavalla torrefioidulle polttoaineelle voidaan luoda edellytykset toimivien markkinoiden aikaansaamiseksi. Tämä vaatii suurten kaupallisten demolaitosten rakentamisen, johon liittyy suuria investointiriskejä. Kuten aiemmin on mainittu, torrefioitu pelletti voi tulla kysymykseen kivihiilen korvikkeena suuressa määrässä kivihiilivoimaloita, mutta muitakin vaihtoehtoja näiden voimaloiden päästöjen pienentämiseksi ja toiminnan jatkamiseksi on olemassa. Uuden sukupolven voimalaitosteknologialla biomassan poltto suoraan ilman torrefiointia esikäsittelynä on mahdollista, jolloin voi olla, että olemassa olevat kivihiilivoimalaitokset muutetaankin osittain biomassan polttoon sopivaksi, jolloin torrefioidun polttoaineen hyödyt voimalaitoksen kannalta merkittävästi vähenevät. Tähän asiaan palataan luvussa 5.2. [36]

## 3.3 Biokemialliset jalostustekniikat

Biokemiallisilla jalostustekniikoilla tarkoitetaan prosesseja, joissa biomassaa muokataan entsyymien, bakteerien ja kemikaalien avulla biopolttoaineiden valmistukseen sopivaan muotoon. Perinteinen esimerkki tällaisesta prosessista on ensimmäisen sukupolven bioetanolin valmistus sokeriruosta käymisreaktion avulla, jota esimerkiksi Brasiliassa on sovellettu jo useita vuosikymmeniä. Biokemialliset jalostustekniikat ovat tähän asti olleet pääasiassa ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden jalostukseen sopivia menetelmiä, joskin myös joissain tapauksissa toisen sukupolven biopolttoaineita on mahdollista valmistaa biokemiallisilla menetelmillä. Tutkimusta näiden menetelmien kehittämiseksi sekä integroimiseksi termokemiallisiin menetelmiin tehdään paljon. Tässä luvussa esitellään lyhyesti kolme yleisintä biokemiallista ja kemiallista jalostusmenetelmää, joiden lopputuotteena saadaan bioetanolia, biodieseliä sekä biokaasua (biometaan).

### 3.3.1 Hydrolyysi ja fermentointi

Fermentointi, eli käyminen, on perinteinen tapa valmistaa etanolia. Tässä prosessissa biomassasta peräisin olevat sokerit muunnetaan etanoliksi ja hiilidioksidiksi enstyyminen, esimerkiksi hiivan, tai bakteerien avulla. Menetelmää on käytetty hyvin kauan juotavaksi tarkoitetun alkoholin sekä esimerkiksi ruokien valmistukseen, mutta myös liikennepolttoaineeksi tarkoitetun etanolin valmistukseen. [37]

Etanolin valmistukseen käytetyn biomassan koostumuksella on merkitystä prosessin hyötysuhteen ja esikäsittelyn tarpeellisuuden kannalta. Käymisen kannalta paras raaka-aine on sellainen, joka omaa valmiiksi helposti fermentoitavia sokereita, kuten glukosia ja fruktoosia. Tästä syystä sokerijuurikas on suosittu bioetanolin raaka-aine Brasiliassa, ja bataatti vastaavasti Kiinassa. Raaka-aineet, jotka ovat helposti fermentoitavissa, ovat yleisesti ottaen myös ihmisen ruoaksi kelpaavia, ja voidaan näin ollen luokitella ensimmäisen sukupolven bioetanolin raaka-aineiksi. Bioetanolin raaka-aineina voidaan käyttää myös lignoselluloosapohjaista biomassaa, kuten puuta tai peltobiomassaa. Tällöin kuitenkin biomassan esikäsittely ennen fermentointiprosessia vaikeutuu huomattavasti. Lignoselluloosapohjaista bioetanolia kutsutaan toisen sukupolven biopolttoaineeksi siksi, koska sen raaka-aineet eivät sovellu ihmisen ravinnoksi. [37]

Biomassan esikäsittelyn tarkoitus on rikkoa biomassan kuitumaista rakennetta hyödyntämällä mm. korkeita lämpötiloja, happokäsittelyä ja höyryräjäytysmenetelmiä. Tämä esikäsittely on usein energiasaastainen prosessi, joka huonontaa etanolin valmistuksen hyötysuhdetta sekä kannattavuutta huomattavasti. Esikäsittelyn tuloksena saatava pilkottu biomassa on tämän jälkeen vielä hydrolysoitava fermentointia varten. Hydrolyysi on prosessi, jossa entsyymien tai happojen sekä lämmön avulla biomassaa koossa pitävät helmiselluloosa, selluloosa sekä ligniini saadaan pilkottua fermentoitaviksi sokereiksi. Viimeisin kehityssuunta nojautuu entsyymien hyödyntämiseen hydrolyysiprosessissa prosessin kannattavuuden parantamiseksi. [37], [38]

Käymisellä valmistettu bioetanol sisältää huomattavan määrän vettä, joten paljon energiaa kuluttava tislusprosessi on tarpeen puhtaan etanolin valmistamiseksi, joka on yleensä tarpeen liikennepolttoaineiden tapauksessa. [39]

### 3.3.2 Vaihtoesteröinti

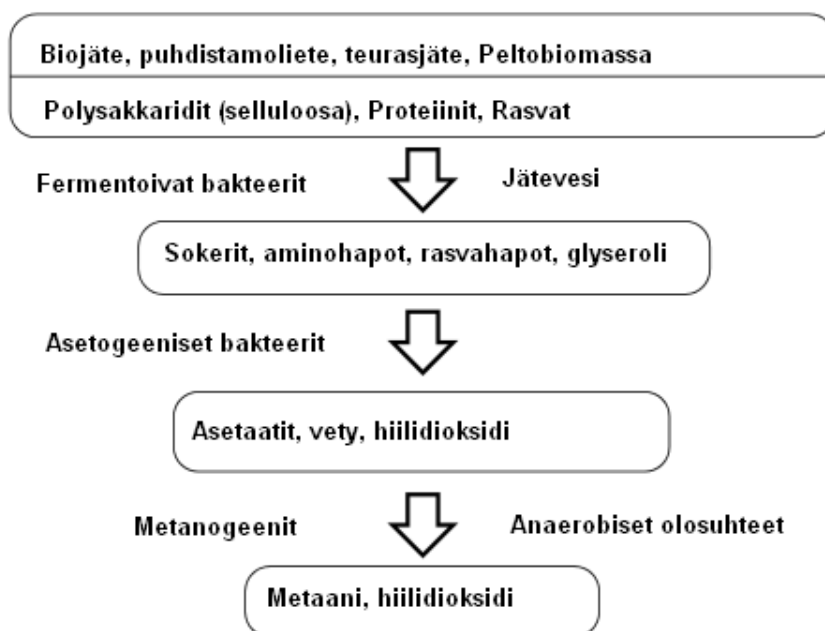
Vaihtoesteröinti on kemiallinen prosessi, jolla kasvipohjaisista öljyistä valmistetaan liikennepolttoaineeksi soveltuvaa biodieseliä. Tähän tarkoitukseen sopivia raaka-ainekasveja ovat mm. soija, rapsi sekä öljypalmut. Myös jätteeksi luokiteltuja öljyjä, kuten paistorasvaa, voidaan käyttää biodieselin vaihtoesteröinnin raaka-aineena. Vaihtoesteröintiin sopivat raaka-aineet ovat pääasiassa myös ihmisen ravinnoksi kelpaavia, joten vaihtoesteröinnillä valmistetun dieselin katsotaan olevan ensimmäisen sukupolven biopolttoainetta. Vaihtoesteröinnissä triglyseridi reagoi alkoholin kanssa vahvan hapon tai emäksen läsnäollessa, jonka tuloksena saadaan alkyylisterien seos sekä glyserolia. Vaihtoesteröinti on verrattain yksinkertainen ja edullinen tapa valmistaa biodieseliä, joskin rajoituksena on soveltuvien raaka-aineiden määrä ja sekä laatu. [40]

### 3.3.3 Anaerobinen hajoaminen

Anaerobinen hajoaminen on kaasutuksen ja metanoinnin ohella toinen tapa valmistaa biokaasua, eli biometaania. Anaerobisen hajoamisen raaka-aineeksi soveltuvat orgaaniset materiaalit, kuten kotitalouksien ja maatalouden jätteet sekä peltobiomassa. Lignoselluloosa ei sovellu mädätykseen hyvin sen sisältämän ligniinin vuoksi. [38]

Anaerobinen hajoaminen tapahtuu hapettomassa tilassa mikrobien mädättäessä orgaanista ainetta kolmessa vaiheessa. Lämpötila prosessissa voi vaihdella reaktorisovelluksesta riippuen 35 – 55 °C välillä. [41] Alapuolella on mädätysprosessin yksinkertaistettu selitys, sekä kulkukaavio:

- Ensimmäisessä vaiheessa orgaaninen aines hydrolysoituu jäteveden kanssa, jolloin fermentoivat bakteerit muuntavat polysakkaridit sokereiksi, proteiinit aminohapoiksi ja rasvat rasvahapoiksi ja glyseroliksi.
- Toisessa vaiheessa sokerit ja aminohapot hajoavat asetogeenisten bakteerien myötävaikutuksesta asetaatiksi ja propanaatiksi.
- Lopuksi metanogeenit muuntavat asetaatin tai vedyn hiilidioksidin kanssa metaaniksi. [38]



Kuva 9. Anaerobisen mädätyksen kulkukaavio.

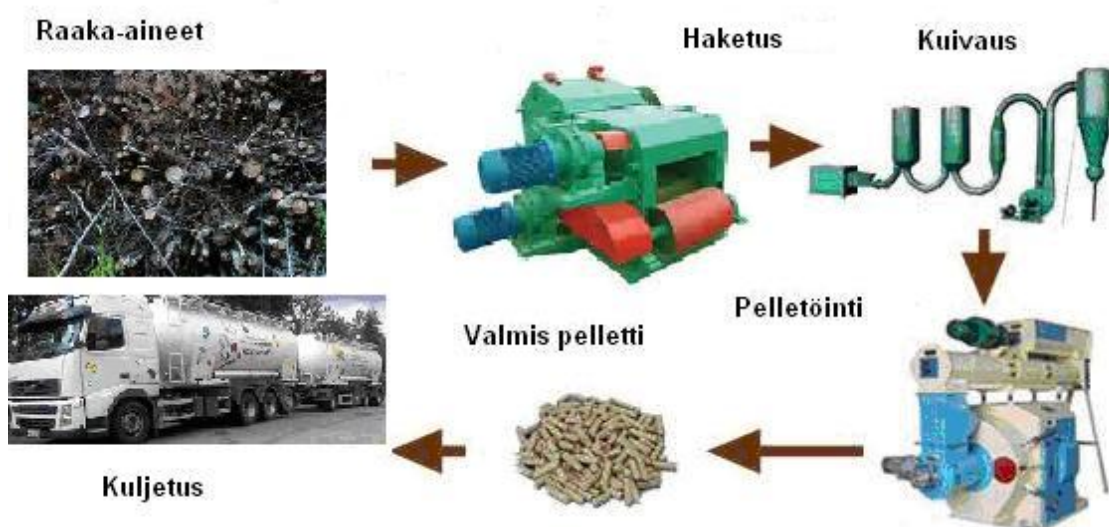
Mädätyksestä saatava raakabiokaasu sisältää 40 - 75 % metaania, sekä 30 - 45 % hiilidioksidia. Metaanin saannot voivat vaihdella prosessiolosuhteiden, kuten käytetyn lämpötilan ja mädätysajan, sekä raaka-aineiden mukaan. Biokaasun valjastamiseksi liikennepolttoaineeksi siitä erotetaan hiilidioksidi, jonka jälkeen suurin osa kaasusta on metaania, jolloin se vastaa täysin maakaasua. Biokaasun tuotannon ohella syntyy myös sivutuotteena suuri määrä mädätysjäännöstä, jota voidaan hyödyntää lannoitteena. [42]

### 3.4 Mekaaniset jalosteet ja biomassan esikäsittely

Mekaanisilla jalostustekniikoilla tarkoitetaan puun jauhamista hakkeeksi sekä tämän jälkeistä pelletöintiä tai briketöintiä. Pelletöinnin tarkoituksena on tiivistää ja kuivata puumateriaali paremmin kuljetukseen ja polttoon sopivaan muotoon, jolloin varsinaisessa käyttökohteessa ei tarvita puun esikäsittelyä. Pelletöinti mahdollistaa pienemmät logistiikkakustannukset hakkeeseen verrattuna. Pelletöintiprosessin kulku on seuraavanlainen:

- Raaka-aineesta seulotaan pois muovi, metalli ym. ei haluttu materiaali
- Raaka-aine kuivataan riittävään kosteuteen, joka on normaalisti noin 10 - 15 %
- Raaka-aine jauhetaan hienoksi ja tasalaatuiseksi vasaramyllyssä
- Tämän jälkeen jauhe kuljetetaan esimerkiksi ruuvikuljettimella puristukseen pelletöintikoneeseen. Näitä on olemassa erilaisia laitetoimittajasta riippuen

- Puun sekaan lisätään liima-ainetta, esimerkiksi ligniiniä, jolla pelletti saadaan pysymään koossa. Liima-aineen määrä on tavallisesti noin 1 % pelletin painosta ja sillä ei ole vaikutuksia pelletin poltto-ominaisuuksiin.
- Raaka-aine puristetaan tämän jälkeen esimerkiksi matriisityyppisen reikälevyn läpi, jossa lämpötila nousee hetkellisesti. Tämän ansiosta ligniini pehmenee, ja muodostaa jäähtyessään adheesiovaikutuksen, jolla pelletti pysyy koossa.
- Reikälevyn jälkeen pelletti katkaistaan terillä oikean mittaiseksi.
- Puristusprosessin jälkeen pelletit jäähdytetään, seulotaan hienoaineksesta ja tämän jälkeen varastoidaan kuljetusta varten. Jäähdytyksessä syntyvä lämpö hyödynnetään esimerkiksi raaka-aineen kuivausprosessissa. Seulonnassa erotettu ylimääräinen materiaali, kuten raaka-puru, kierrätetään takaisin pelletöintiprosessiin.
- Pelletit voidaan varastoida tehdasalueella suuriin silloihin tai ne voidaan myös säkittää. Pelletin varastoinnissa on pidettävä huoli, että ne eivät pääse tekemisiin kosteuden kanssa, sillä pelletit imevät itseensä kosteutta. Pelletit saattavat myös hajotessaan muodostaa hiilimonoksidia, joten kunnollisesta ilmanvaihdosta on huolehdittava pellettien varastoinnin yhteydessä. [43]



Kuva 10. Pelletöinnin vaiheet.

Puubiomassaa raaka-aineenaan käyttävän biojalostamon tapauksessa raaka-aineiden esikäsittely on aina tärkeässä asemassa, on kyseessä sitten termokemiallinen, kemiallinen tai ainoastaan mekaaninen jalostusprosessi. Puuraaka-aineen esikäsittelyyn ennen varsinaisia jalostusprosesseja kuuluu puun jauhaminen sopivaan palakokoon, eli yleisesti ottaen haketus. Riippuen jalostamon infrastruktuuriratkaisuista, haketus voi tapahtua jalostamon luona, tai aiemmin raaka-aineen tuotantoketjussa, esimerkiksi välivarastossa. Edelleen tärkeä osa esikäsittelyä on puun kuivaus, joka pyritään toteuttamaan sekä luonnollisena kuivumisena raaka-aineen tuotantoketjussa, että varsinaisella kuivurilla biojalostamon luona. Kuivurin tarvitsema lämpöenergia pyritään tuottamaan biojalos-

tamon prosessien yhteydessä niin, että tähän vaiheeseen ei tarvita ulkopuolista energiaa. Luonnollisella kuivauksella saavutettava puun kosteusprosentti on noin 35 - 40 %. Kuivureilla päästään yleisesti ottaen noin 10 - 12 % kosteuteen. [15] Jalostusprosesseilla voi olla erilaisia vaatimuksia raaka-aineen kosteuden suhteen. Esimerkkinä ECN:n MI-LENA -kaasutuslaitteisto, joka vaatii alle 25 % kosteuden raaka-aineeltaan. [44]

Puun esikäsittelyllä on suuri merkitys biojalostamoprosessien hyötysuhteen kannalta, sillä haketus kuluttaa runsaasti sähköenergiaa, joka vaikuttaa suoraan laitoksen kokonaishyötysuhteeseen. Kuivurit tarvitsevat myös jonkin verran sähköä toimiakseen lämpöenergian lisäksi. Koska esikäsittelyvaihe on läsnä jalostusprosessista riippumatta, on tärkeää, että se mitoitetään optimaalisesti jalostamoprosessien mukaan.

### 3.5 Biojalostamoon integroitu CHP-tuotanto

Tällä hetkellä suurin osa biomassaa hyödyntävistä kaasutuslaitteistoista on valjastettu CHP-tuotannon yhteyteen. Kaasuttimesta saatavaa polttokaasua voidaan polttaa kaasuturbiinissa sekä polttokattiloissa. Eräästä tällaisesta ratkaisusta käytetään nimeä IGCC (Intergated Gasification Combined Cycle). IGCC-laitteisto koostuu kaasuttimesta, kaasuturbiinista sekä jätelämpökattilasta ja höyryturbiinista. Kaasuttimesta saatava polttokaasu poltetaan kaasuturbiinissa, jolla tuotetaan sähköä. Turbiinista poistuvan savukaasuvirran lämmöllä tuotetaan jätelämpökattilassa höyryä, jonka avulla tuotetaan sähköä höyryturbiinissa. Kaasutuksen ansiosta huonolaatuisia kiinteitä polttoaineita, kuten biomassaa tai jätteitä, voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön tuotannossa hyvällä hyötysuhteella. Kaasutuksesta saatavan polttokaasun laatuvaatimukset ovat huomattavasti pienemmät verrattuna biopolttoaineiden tuotantoon tarkoitettuun synteesikaasuun. Tämä tarkoittaa luonnollisesti säästöjä, kun monimutkaisia biopolttoaineiden valmistukseen tarvittavia kaasun jälkikäsittelylaitteistoja ei tarvita. Biojalostamon yhteyteen integroitu IGCC-laitos voisi hyödyntää samaa raaka-aine-virtaa kuin varsinaiset biojalostamoprosessit. [45]

Toinen vaihtoehto sähkön ja lämmön tuotannolle on biojalostamoprosesseista mahdollisesti ylijäävää lämpöä hyödyntämällä. Monet termokemialliset jalostusprosessit ovat autotermisiä, ja tuottavat enemmän lämpöenergiaa kuin tarvitsevat prosessin ylläpitoon, jolloin ylijäämälämpöä on pyrittävä hyödyntämään muissa prosesseissa, kuten puun kuivaamisessa. Ylijäämälämmöllä voidaan, prosessiyksityiskohdista riippuen, tuottaa myös höyryä, jota voidaan käyttää höyryturbiinin käyttövoimana sähkön tuotannossa. Myös kaukolämmön tuotanto olisi mahdollista höyryturbiinin ohella. Ylijäämälämpöä voisi hyödyntää myös mahdollisesti joku muu teollisuuden prosessi. Teknisiä vaihtoehtoja lämmön hyödyntämiselle löytyy ja näiden hyödyntäminen riippuisi pitkälti alueellisista ja tapauskohtaisista seikoista. [45]



## 4 BIOJALOSTAMO HATTULAAN

Hattulan Merven alue on osoittautunut varteenotettavaksi kohteeksi mahdolliselle tulevalle biojalostamoinvestoinnille. Jyri Makkonen KY on tehnyt Hämeen Liiton tilauksesta kartoituksen Hämeen metsien nykytilanteesta, jonka perusteella suuren kokoluokan metsäenergiaan perustuvan biopolttoaineiden jalostamon toiminta olisi Kanta-Hämeessä mahdollista.

Tässä luvussa on tarkoitus luoda katsaus Hattulan Merven alueeseen biojalostamon sijaintina, sekä luoda mitoituspohja laitoksen konseptin hahmottelemiseksi. Laitoksen teknisen konseptin valitsemiseksi toteutetaan kannattavuusvertailu kolmen erityyppisen jalostusvaihtoehdon kesken. Nämä vaihtoehdot perustuvat tämän hetkiseen teknologiatilanteeseen, ja ovat suuntaa antavia arvioita konseptin kustannusten suuruusluokasta sekä kannattavuudesta. Vertailuun valitut tekniset vaihtoehdot ovat tällä hetkellä pitkälti kaupallisessa demonstroituvaiheessa, joten on todennäköistä, että teknikoiden kunnolla kaupallistuessa kustannukset putoavat huomattavasti. Tätä silmälläpitäen vertailussa otettiin huomioon myös tuotanto- sekä investointitukien merkitys laitoksen kannattavuuteen. Vertailuun valitut tekniikat on valittu myös huomioiden Suomen voimallistusten tarpeet uusiutuvan energian osuuden lisäämiselle, sekä IED-direktiivin asettamien vaatimusten täyttämiseksi. Valituilla biojalostustekniikoilla on mahdollista valmistaa fossiilisia polttoaineita korvaavia biojalosteita olemassa olevien voimalaitosten käyttöön.

Vertailussa valitun teknisen konseptin lisäksi viimeisessä luvussa esitetään biojalostamoprojektin teoreettinen toteutusaikataulu vastaavista projekteista saatujen referenssitietojen pohjalta.

### 4.1 Hämeen metsien tilanne

Jyri Makkosen tekemässä selvityksessä todetaan, että Suomen metsäteollisuuden rakenteissa on tapahtumassa suuria muutoksia. Perinteisen metsäteollisuussektorin toiminnan vähentyessä puun käyttö biotalouden raaka-aineena sekä uusiutuvana energianlähteenä tulee kasvamaan yhä voimakkaammin. Energiakäyttöön tulee vapautumaan entistä enemmän puuresursseja etenkin kuitupuun muodossa, mikäli metsäteollisuuden toiminta Hämeen alueella vähenee entisestään. Kanta- ja Päijät-Hämeen metsät ovat tällä hetkellä vajaakäytössä. Puun vuotuisesta 5 miljoonan m<sup>3</sup>:n kasvusta 25 % jää kokonaan

käyttämättä pelkästään Hämeen alueella. Tämän lisäksi Makkosen selvityksessä on todettu, että metsänhoidon tehostamisella voidaan lisätä energiapuuresursseja viemättä metsäteollisuudelta raaka-ainepohjaa. Teoriassa siis Hattulan Mervessä toimivalle suu-  
relle biojalostamolle löytyisi riittävästi raaka-aineita Kanta- ja Päijät-Hämeen alueilta. Myös kauempaa junakuljetuksena tuotu energiapuu olisi mahdollista hyödyntää biojalostamon raaka-aineena. [46]

## **4.2 Hattulan Mervi biojalostamon sijaintina**

### **4.2.1 Merven teollisuusalue**

Hattulassa sijaitseva Merven teollisuusalue on valittu tässä työssä käsiteltävän suuren biojalostamon sijainniksi. Mervi sijaitsee Hattulassa Hämeen ytimessä noin 100 kilometrin etäisyydellä Helsingistä. Sen valintaa biojalostamon sijainniksi puoltaa Etelä-Suomen suurten kaupunkien ja voimalaitosten läheisyys, sekä raaka-aineiden saatavuus Hämeen alueelta. Merven teollisuusalueen lähialueet eivät ole tiheään asuttuja, ja siellä sijaitsee jo ennestään teollisuutta. Teollisuusalueella sijaitsevalle Onnisen terästerminaalille kulkee raskasta liikennettä.

### **4.2.2 Kaukolämpö- ja maakaasuverkot**

Alueen läheisyydessä kulkee Elenia Lämpö OY:n ylläpitämä kaukolämpöverkosto, johon liittyminen on tarpeen tullen mahdollista ylijäämälämmön hyötykäyttöä ajatellen. Gasum OY:n hallinnoima maakaasuverkko kulkee niin ikään Hattulassa, ja tähän verk-  
koon liittyminen mahdollistaisi biokaasun kuljetuksen voimalaitoksille sekä mahdollisesti liikenteen käyttöön. Tämä on suuri etu logistisesta näkökulmasta, ja puoltaisi siten synteettisen maakaasun jalostamista Mervessä.

### **4.2.3 Kulkuyhteydet**

Tärkeä kriteeri Merven valinnassa biojalostamon sijainniksi ovat sen mahdollistamat kulkuyhteysvaihtoehdot. Mervi sijaitsee valtatie 3:n vierellä, joten suuren raskaan liikenteen määrän ohjaaminen jalostamolle on toteutettavissa järkevästi. Alueelle on myös rautatieyhteys olemassa, joka mahdollistaisi suuren mittakaavan junakuljetukset sekä raaka-aineen tuontiin, että valmiiden jalosteiden kuljettamiseen voimalaitoksille, sekä rannikolle meriyhteyksiä varten. Makkosen selvityksessä mainitaan jalosteiden merikuljetuksia varten otollinen Porvoon Tolkkisten syväsatama, johon on valmiiksi kaavoitettu rautatieyhteys. [46]

### 4.3 Jalostamokonseptin reunaehdot

Tässä työssä suoritettavaa alustavaa jalostamokonseptin mitoitusta varten on perustaksi muodostettu reunaehdot, jotka koostuvat raaka-aineiden saantia koskevista arvioista, jalosteiden loppukäyttäjien preferensseistä sekä ylijäämälämmön hyötykäytön rajoituksista.

#### 4.3.1 Kaukolämpö

Biojalostamon hyötysuhteen kannalta prosesseissa syntyvä lämpö on pyrittävä käyttämään mahdollisimman hyvin hyödyksi. Osa tästä lämmöstä on järkevää käyttää raaka-aineiden kuivaukseen, sekä mahdollisuuksien mukaan kaukolämpöön. Elenia Lämmön hallinnoima kaukolämpöverkko on tässä tapauksessa olennainen osa tämän lämmön hyödyntämistä. Näin ollen jalostamon prosessilaitteisto mitoitetaan tässä työssä perustuen kyseisen kaukolämpöverkon mahdollisuuksiin ottaa vastaan kaukolämpöä. Elenia Lämmöltä saatujen tietojen mukaan kaukolämmön teoreettinen vuotuinen vastaanotto-kyky voisi olla noin 170 – 280 GWh/a.

#### 4.3.2 Raaka-aineiden saatavuus

Hämeen alueelta saatavissa olevista energiapuumääristä on tässä vaiheessa olemassa vain arvioita. Jyri Makkosen selvityksessä mainitaan, että teoriassa jopa 2 miljoonan kiintokuutiometrin raaka-ainevarat voisivat olla käytettävissä. Tämä määrä kuitenkin vaatisi pitkän kehitystyön puunhankintaketjussa, ja onkin todennäköisempää, että saatavissa oleva energiapuupotentiaali olisi alussa huomattavasti pienempi. Jalostamon käyttöön saatavaksi raaka-aineiden määräksi alkuvaiheessa oletetaan noin 1 000 000 kiintokuutiometriä. Tämä vastaa energiasisällöltään noin 2 TWh, ja toimii laitoksen mitoituksen perustana.

#### 4.3.3 Biojalostamon halutut lopputuotteet

Hattulan biojalostamon ensisijaiset jalostustavoitteet ovat voimalaitoksiin sopivat biopolttoaineet. Tämän takia nestemäiset polttoaineet, pois lukien pyrolyysiöljy, eivät tulisi kysymykseen. Pyrolyysiöljyn soveltuminen voimalaitosten pääpolttoaineeksi on myös rajallista ja sisältää omat tekniset haasteensa, jonka takia sen tuotanto jätetään konseptin osalta tarkastelematta.

## **SNG**

Ehkä mielenkiintoisin puun jalostusmuodoista on SNG, eli synteettinen maakaasu. Merven alueen läheisyys Gasumin maakaasuverkkoon puoltaa voimakkaasti tätä lähestymistapaa, sillä biopolttoaineiden kuljetus aiheuttaa suuria vaikeuksia etenkin kaupunkialueilla. Maakaasuputkea voisi hyödyntää suoraan jalosteiden kuljetukseen voimalaitoksille, liikenteen tarpeisiin sekä mahdolliseen ulkomaanvientiin. Olemassa olevissa voimalaitoksissa SNG:llä voidaan korvata maakaasua, joka vähentää suoraan laitoksen CO<sub>2</sub>-päästöjä huomattavasti. Etelä-Suomen alueella on runsaasti voimalaitoksia, jotka tuottavat sähköä ja lämpöä pääasiassa maakaasun avulla. SNG soveltuu erittäin hyvin myös liikenteen polttoaineeksi nyt ja tulevaisuudessa. Henkilöautoihin vaadittavat muutokset SNG:n käyttöä ajatellen ovat pieniä ja edullisia.

### ***Torrefioitu puu***

Kuten aiemmin on mainittu, torrefioidulla puulla voidaan korvata kivihiiltä pölypoltto-kattiloissa mahdollisesti jopa 50 %. Torrefioitu puu tai TOP-pelletti omaavat suuren energiatheyden, jonka johdosta niiden kuljetuskustannukset ovat suhteessa pienemmät kuin tavallisen pelletin ja etenkin hakkeen. Torrefioinnilla mahdollistettaisiin siis pidemmät kuljetusmatkat polttoteknisten etujen lisäksi. Suomessa torrefioidun puun käyttömahdollisuudet konkretisoituisivat rannikon seitsemään kivihiilen pölypolttolaitokseen. Vientituotteena TOP-pelletillä voi olla suuri potentiaali tulevaisuudessa.

### ***Pelletti ja hake***

Leijukerrostekniikkaan perustuvissa voimalaitoksissa fossiilisia polttoaineita voidaan korvata osittain tai kokonaan hakkeella ja puupelleteillä ilman teknisiä muutoksia. Sekä hakkeelle, että pelletille on tulevaisuudessa yhä enemmän kysyntää voimalaitoksissa. Näissä polttoaineissa rajoittavana tekijänä ovat lähinnä kuljetuskustannukset, eli pitkät kuljetusmatkat etenkin hakkeen tapauksessa eivät ole mahdollisia.

## **4.4 Vartenotettavat vaihtoehdot jalostamokonseptille**

Tähän työhön vertailtavaksi on valittu kaksi erilaista biojalostamokonseptia. Jalostamotratkaisut eroavat toisistaan lopputuotteiden sekä investointikustannusten osalta huomattavasti. Molemmat tekniset konseptit on mitoitettu edellisen luvun reunaehtojen perusteella. Jalostamon rakennus- ja käyttökustannuksista on tehty arviot, joiden perusteella on hahmoteltu konseptin kannattavuutta. Herkkyysanalyysin avulla on pyritty tuomaan esille kustannusrakenteen kohdat, jotka vaikuttavat kriittisimmin jalostamon kokonaiskannattavuuteen.

#### 4.4.1 Kaasutus + metanointi + kaukolämpö

Ensimmäiseksi biojalostamokonseptiksi on valittu biomassan kaasutukseen perustuva ratkaisu. Tässä prosessissa puubiomassa kuljetetaan Merveen hakettavaksi ja kuivatavaksi, jonka jälkeen biomassa kaasutetaan. Kaasuttimesta saatava tuotekaasu suodataan, puhdistetaan ja jälkikäsitellään metanointiprosessissa synteettiseksi maakaasuksi, eli SNG:ksi. Saatu kaasu siirretään Gasum:n maakaasuverkkoon, jossa se voidaan kuljettaa asiakkaille. Jalostamossa tuotetaan SNG:n ohella kaukolämpöä, jolla laitoksen kokonaishyötysuhdetta saadaan parannettua. Osa prosessin tuottamasta ylijäämälämmöstä käytetään biomassan kuivaukseen kuivurissa.

Bio-SNG omaa suuren potentiaalin fossiilisten polttoaineiden korvaajana tulevaisuudessa niin voimalaitoksissa kuin liikenteessäkin, joten sen valinta tähän vertailuun on perusteltua.

##### 4.4.1.1 Jalostamoprosessin kulku

###### *Esikäsittely*

Jyri Makkosen selvityksen mukaan kilpailukyvyn maksimoimisen kannalta paras ratkaisu on haketus suoraan jalostamon läheisyydessä. Tällöin kaikki puu saapuu 5,5m määrmittaan pätkittynä suoraan jalostamoalueelle. Puu on kuivattu mahdollisimman hyvin luonnossa ennen käyttöpaikalle tuontia, eli noin 35 - 40 prosentin kosteuteen. [15] Haketukseen käytetään suuria kiinteitä hakkureita johtuen puun suuresta määrästä. Hakkurit tulee rakentaa suojaavien rakennusten sisään, jotta pöly- ja meluongelmilta voidaan välttyä. Haketuksen jälkeen hake varastoidaan siloihin, jossa se ei pääse vettymään uudelleen. [47] Kaasutusprosessia varten hake tulee edelleen kuivata sopivaan, noin 15 prosentin, kosteuteen. Tätä varten on jalostamoalueella kuivuri, joka hyödyntää kaasutusprosessista saatavaa ylijäämälämpöä. Lämmön tarve riippuu siitä, kuinka hyvin puuraaka-aine on kuivattu ennen jalostamolle saapumista. Kuivaamisen jälkeen hake on valmista kaasutettavaksi.

###### *Kaasutin*

Kaasuttimena toimii tässä konseptissa kupliva leijukerroskaasutin, jossa kaasutuksen väliaineena toimivat happi ja vesihöyry. Kaasutin on suora kaasutin, jolloin kaasutus-

prosessin tarvitsema lämpöenergia saadaan tuotettua biomassan osittaispoltolla samassa leijukerroksessa. Kaasutin toimii ylipaineessa noin 850 °C lämpötilassa, jolloin syntyvässä tuotekaasussa on hiilimonoksidin ja vedyn lisäksi muun muassa raskaita hiilivetyjä, kuten tervaa. Jotta kaasua voidaan jalostaa edelleen, täytyy tuotekaasu puhdistaa ei-halutuista yhdisteistä kaasutuksen jälkeen. Happikaasutuksen ansiosta tuotekaasu ei sisällä juurikaan typpeä, mistä on etua metanointiprosessin kannalta. Kaasuttimesta saadaan tuotekaasun lisäksi lämpöenergiaa, jota hyödynnetään laitoksen lämpöä tarvitsemissä prosesseissa.

### ***Ilmakaasulaitos***

Kaasutuksen väliaineena toimii vesihöyryn lisäksi ilmasta erotettu happi, jonka tuotantoa varten tarvitaan erillinen ilmakaasutehdas. Tässä tehtaassa ilman eri komponentit, eli typpi, happi ja argon, erotetaan toisistaan vaiheistetun paineistuksen ja tislauksen avulla. Suuresta tarvittavasta puristustyöstä johtuen ilmakaasutehdas tarvitsee toimiakseen huomattavan määrän sähköä, joka tuotetaan laitokseen integroidussa höyryturbiinissa.

### ***Höyrykattila + turbiini***

Jalostamo tarvitsee toimintaansa varten sähköä ja prosessihöyryä. Tätä varten laitos sisältää höyrykattilan, jonka polttoaineena toimii metsähake. Tämä hake otetaan samasta raaka-ainevirrasta, joka kulkee myös jalostusprosessiin. Höyrykattilassa tuotetulla höyryllä pyöritetään höyryturbiinia, joka tuottaa sähköä laitoksen omiin tarpeisiin. Turbiinista poistuva höyryvirta hyödynnetään lämpöenergiana muun muassa jalostamon kaasunkäsittelyprosesseissa.

### ***Kaasun puhdistus***

Kaasutuksen jälkeen tapahtuva kaasun puhdistus on kriittinen osa koko jalostusprosessia. Kaasun puhdistus koostuu useasta vaiheesta. Ensimmäisenä tapahtuu tervojen katalyyttinen reformointi, joka tapahtuu korkeassa, noin 900 °C lämpötilassa. Reformeerissa raskaat tervayhdisteet sekä kevyemmät hiilivedyt pyritään muuntamaan katalyyttimateriaalien avulla vedyksi ja hiilimonoksidiksi. Lisäksi reformoinnin ohella voidaan vaikuttaa tuotekaasun sisältämän metaanin ja ammoniakkin määriin, sekä  $H_2/CO$ -suhteeseen shift-reaktiossa.

Reformoinnin jälkeen tuotekaasu jäädytetään ja suodatetaan muista ei-halutuista yhdisteistä erilaisten suodattimien, sekä kemiallisten pesureiden avulla. Kaasun käsittelyn tuloksena saadaan puhdasta synteetikaasua, joka on vielä paineistettava metanointilaitokselle sopivaan paineeseen.

### ***Metanointi***

Metanointivaiheen tarkoituksena on muuntaa puhdas synteetikaasu pääasiassa metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Metanointi on niin ikään katalyyttinen prosessi, jossa tarvitaan höyryä ja sähköä.

### ***CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O poisto***

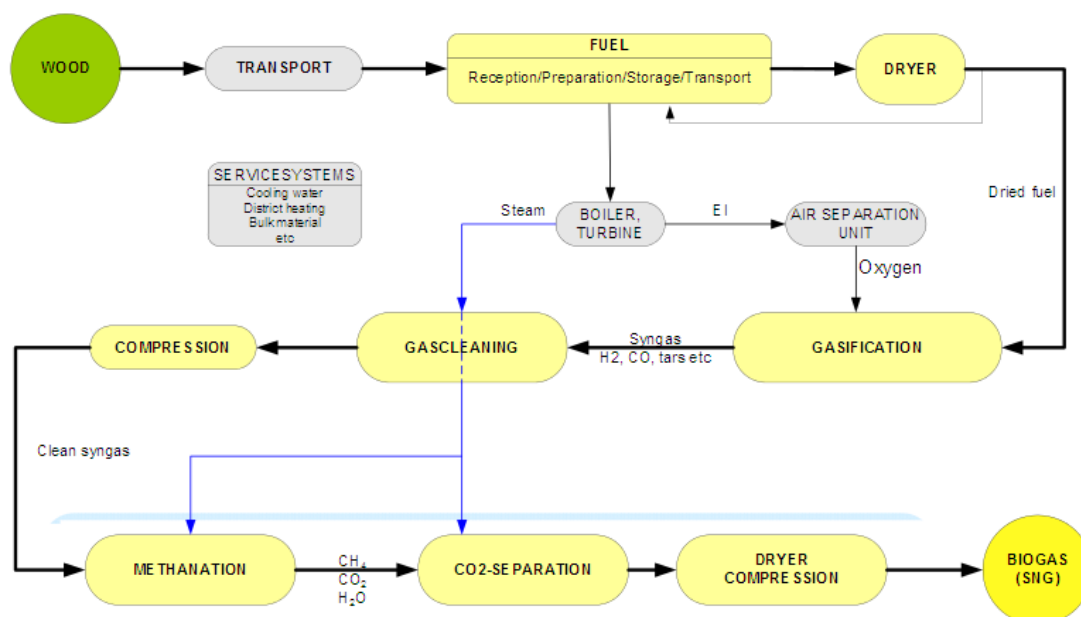
Metanointilaitokselta saatava kaasu sisältää suurimmaksi osaksi metaania, jonkin verran hiilidioksidia ja vettä, sekä pieniä määriä muita yhdisteitä. Jotta kaasu voidaan syöttää maakaasuverkkoon, on sen koostumuksen vastattava pitkälti maakaasua. Tämä tarkoittaa sitä, että hiilidioksidi ja vesi on erotettava kaasusta. Hiilidioksidi erotetaan kaasusta korkeassa paineessa toimivalla vesipesurilla. Tämän jälkeen vesi poistetaan kaasusta kuivaamalla.

### ***Paineistus ja siirto putkeen***

Kaasu on nyt koostumukseltaan valmis siirrettäväksi maakaasuverkkoon. Tätä varten sen paine tulee säätää maakaasuverkon vaatimaan, noin 30 barin paineeseen erillisellä kompressorilla.

### ***Kaukolämmön tuotanto***

Jalostamolla tuotetaan lämpöenergiaa sekä kaasutusprosessissa, että höyrykattilassa. Tätä lämpöä käytetään hyödyksi jalostamon prosesseissa, kuten raaka-aineen kuivauksessa, kaasun puhdistuksessa ja metanoinnissa. Kaikkea lämpöenergiaa ei kuitenkaan voida käyttää hyödyksi pelkästään jalostamon prosesseissa, joten näistä jäljelle jäävä ylijäämälämpö käytetään hyödyksi kaukolämmön tuotantona. Saatavan kaukolämmön määrä riippuu käytännössä kuivurin tarvitseman lämmön määrästä, eli suoraan raaka-aineen kosteuspitoisuudesta. Tämän takia onkin pyrittävä kuivaamaan raaka-aine mahdollisimman hyvin luonnollisin keinoin ennen kuivuria.



Kuva 11. Jalostamon prosessikaavio. Lähde E.ON. [48]

#### 4.4.1.2 Jalostamon ominaisuudet ja tuottomäärät

Alla olevaan taulukkoon on listattu jalostamon avainluvut, jotka perustuvat E.ON:n arvioihin. [48]

Raaka-aine sisään (40% kosteus)	900 000 m <sup>3</sup>
Raaka-aineen energiasisältö	2 TWh
Vuotuiset käyttötunnit	8000
Polttoaineteho	250 MW
Kokonaishyötysuhde	78 %
SNG tuotannon hyötysuhde	64 %
Sähkön tuotantoteho (omaan käyttöön)	8MW
Kaukolämmön tuotantoteho (riippuen raaka-aineen kosteudesta)	35 MW
SNG saanto /a	1280 GWh
Kaukolämmön saanto /a	280 GWh

Taulukko 3. Jalostamon avainluvut.

#### 4.4.1.3 Investointikustannukset

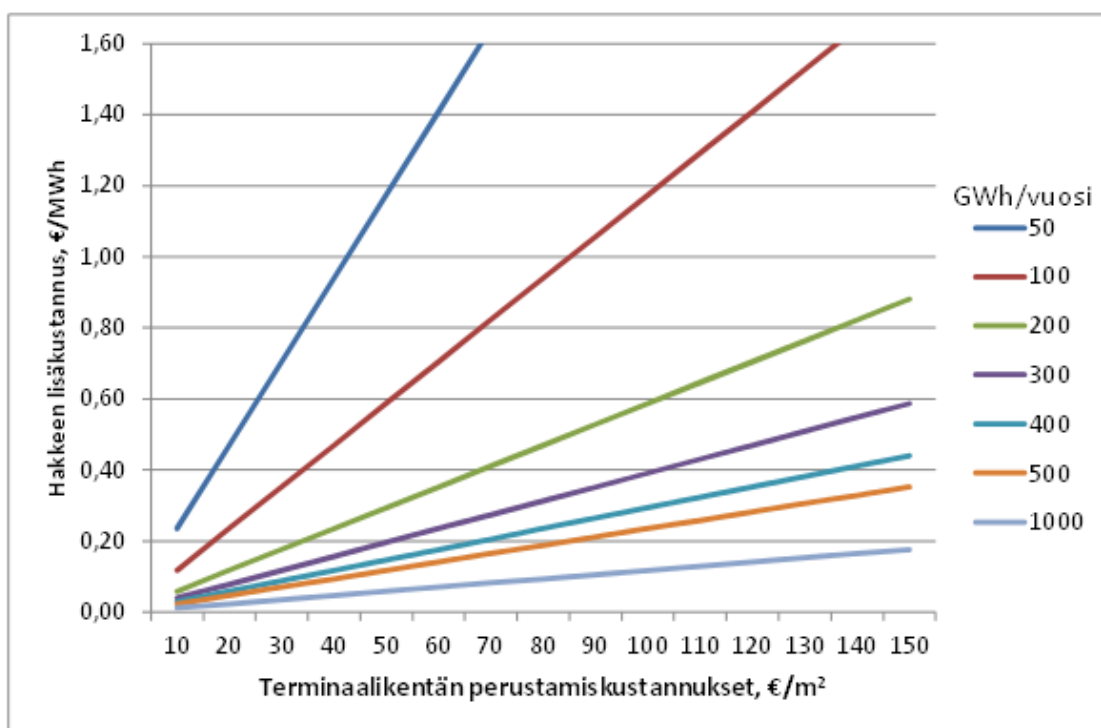
Tämän luvun tarkoitus on hahmotella jalostamon kokonaisinvestointikustannuksia kirjallisuuteen perustuvilla arvioilla. Johtuen teknologian kehitysvaiheesta, kustannukset voivat todellisuudessa erota paljonkin tässä luvussa arvioiduista summista. Näin ollen päämääränä onkin muodostaa suuntaa antava arvio kustannuksien suuruusluokasta, jonka perusteella voidaan tehdä alustavia arvioita laitoksen kokonaiskannattavuudesta. Jalostamon investointikustannukset koostuvat terminaalien rakentamisesta, raaka-aineiden



esikäsittelykalustosta, eli hakettimista ja murskaimista, kuivurista, sekä varsinaisesta kaasutus- ja metanointilaitteistosta.

### ***Terminaali***

Jalostamon toiminnan mahdollistamiseksi on sen välittömään läheisyyteen perustettava puun vastaanottoterminaali, jossa tapahtuu puun haketus, kuivaus sekä varastointi. VTT:n terminaalikäsikirjassa tuodaan esille esimerkkitapaus biopolttoaineterminaalin rakentamiskustannuksien vaikutuksesta hakkeen hintaan. Mitä suurempi on terminaalin kapasiteetti, sitä pienemmät ovat kustannuslisät hakkeelle. Tätä on hahmoteltu kaaviossa 1.



*Kaavio 1. Terminaalin perustamiskustannusten vaikutus tuotetun metsähakkeen hintaan (€/MWh) eri vuosituotannolla ilman laitekustannuksia. Terminaalin pinta-ala noin 1 ha, toiminta-aika 20v, korko 10%. [49] [VTT, biopolttoaineterminaalit]*

Kaaviosta 1 nähdään, että 1 TWh vuosituotannolla lisäkustannukset hakkeelle ovat alle 0,2 €/MWh. On siis perusteltua käyttää tätä arvoa laskelmien pohjana.

Suuren terminaalin tapauksessa hakettimille ja murskaimille asetetaan erityisvaatimuksia. Kapasiteetista johtuen mobiilihakkurit eivät tule kysymykseen, joten on tarkoituksenmukaista valita suuret kiinteät hakkurit, jotka omaavat yleensä pitkän käyttöiän, suuren tuottavuuden sekä edulliset käyttökustannukset. Melun ja pölyn torjunta tulee ottaa huomioon suurilla hakkureilla, jolloin ne on sijoitettava suojarakennukseen. Tällaisen

haketuslaitteiston pääomakustannukset ovat Rinteen mukaan noin 1 €/MWh suurelle terminaalille 10 prosentin korkotasolla. [50]

### ***Jalostamo***

Suurimman osan kustannuksista muodostaa varsinainen jalostamolaitteisto. VTT:n arvion mukaan 200 MW SNG-kapasiteetin omaavan SNG-jalostamon kokonaisinvestointikustannukset olisivat 412,5 miljoonaa euroa. Tähän on sisällytetty koko tarvittava laitteisto mukaan lukien raaka-aineen kuivaus ja käsittelylaitteisto, joiden osuus kustannuksista on noin 40 miljoonaa euroa. Lisäksi laitteistoon kuuluu ylijäämälämpöä hyödyntävä HRSG-kattila (heat recovery steam generator) sekä höyryturbiini sähkön tuotantoon, joista aiheutuu 70 miljoonan euron kulut. [51]

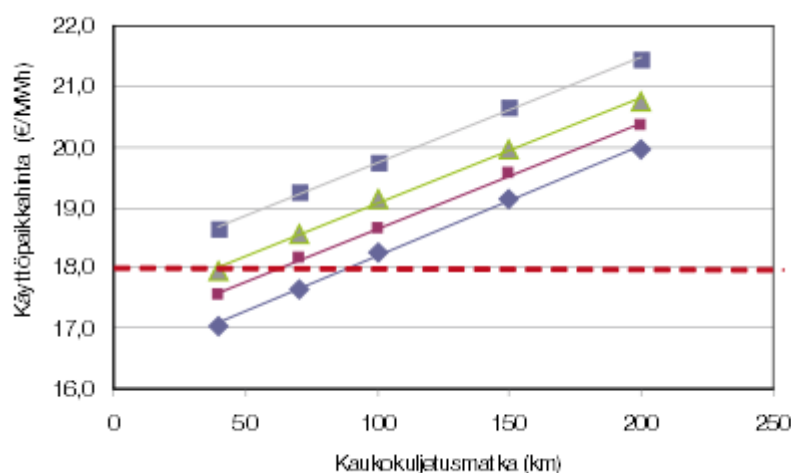
Toinen arvio SNG-jalostamon kustannuksista löytyy ECN:n van der Drift:n tekemästä tutkimuksesta, jonka mukaan alkuvaiheen laitoksen investointikustannukset olisivat luokkaa 1400 \$/kW polttoainetehoa. Merven jalostamon tapauksessa biomassan saataavuus on alussa 2 TWh, ja polttoainetehoksi arvioitiin noin 250 MW. Tätä kirjoitettaessa 15.3.2013 dollarin kurssi on noin 1,3. Näiden perusteella voidaan laskea Merven jalostamon investointikustannuksiksi van der Drift:n arvion mukaan noin 270 miljoonaa euroa. [52]

Nämä arviot huomioon ottaen voidaan olettaa, että Merveen soveltuvan jalostamon laitteiston investointikustannukset olisivat luokkaa 300 miljoonaa euroa kokonaisuudessaan. Investointikustannusten jakautuminen käyttövuosille suoritetaan annuiteettimennetelmää hyväksi käyttäen tarkastelemalla kahta eri laitoksen pitoaikaa, sekä 5 ja 10 prosentin korkotasoja. Nämä tarkastelut löytyvät luvusta 4.4.1.6.

#### **4.4.1.4 Käyttökustannukset**

Käyttökustannuksista suurimman osan muodostavat raaka-aineet, eli energiapuu. Jyri Makkosen selvityksen mukaan energiajakeen hinta käyttöpaikalle tuotuna on noin 20 - 25 €/MWh. [15] Tätä käsitystä tukee myös Pöyryn puupolttoaineiden hintaseuranta. [53]

Taulukossa 4 on esitetty metsä- ja kaukokuljetuksen vaikutus pienpuun hintaan. Taulukosta nähdään, että noin 100km kuljetusmatkalla 20 €/MWh hinta voisi olla realistinen Mervenkin tapauksessa. Näiden seikkojen perusteella kannattavuuslaskennassa on käytetty puun hinnalle arvoa 20 €/MWh. Korkeampikin hinta puulle otetaan herkkyystarastelussa huomioon, sillä puubiomassan kysynnän kasvaessa sen hintakin oletettavasti nousee. Merven jalostamon tapauksessa 20 €/MWh raaka-ainehinta tarkoittaisi vuodessa 40 miljoonan euron raaka-aine-kustannuksia.



*Taulukko 4. Pienpuun käyttöpaikkahinta kantorahoineen. Täplillä on kuvattu metsäkuljetusmatkoina 150, 150, 350 ja 500 metriä. Kaukokuljetusmatkoina 40, 70, 100, 150 ja 200 kilometriä. Lähde TEM. [54]*

Haketuksen muuttuvat kustannukset koostuvat Rinteen mukaan työvoimakustannuksista, energiakustannuksista, huoltokustannuksista sekä muista pienistä eristä. Suuren terminaalien tapauksessa nämä tekevät hakkeelle yhteensä noin 1 €/MWh kustannuslisän. [50] Tämä kustannuslisä on otettu huomioon jalostamon käyttökustannuksissa, joten sitä ei tarvitse erikseen huomioida laskuissa.

Palkat kuuluvat olennaisena osana jalostamon käyttökuluihin, sillä oletuksena jalostamo on jatkuvatoiminen, ja työvoima tekee töitä kolmessa vuorossa. Lisäksi tarvitaan 2 lisävuorua paikkaamaan mahdollisten sairastapausten ja lomien aiheuttamia henkilöstövajauksia. Eli yhden henkilön jatkuva läsnäolo jalostamolla tarkoittaa käytännössä 5 henkilön palkkaamista. Laitetoimittajilta saatujen tietojen perusteella paikanpäällä tarvittaisiin jatkuvasti 12 henkilöä. Tämä tarkoittaa yhteensä 60 henkilöä. Kun oletetaan vuosittaisiksi palkkakuluiksi sosiaalimaksut mukaan luettuna noin 60 000 €/a, saadaan palkkakustannuksiksi yhteensä 3 600 000 €.

Laitos tuottaa itse tarvitsemansa lämpö ja sähköenergian, ja näiden vaatima polttoaineen osuus on otettu huomioon jalostamon kokonaishyötysuhteessa, jolloin niiden osuutta ei tarvitse ottaa erikseen laskuissa huomioon.

Huolto-, kunnossapito- ja käyttökustannusten perustaksi voidaan asettaa 10 prosenttia vuotuisista pääomakustannuksista. Näiden suuruus selviää ottamalla huomioon jalostamon pitoaika ja korkotaso, joten huollon ja kunnossapidon kustannusten suuruus selviää myös luvussa 4.4.1.6.

Jalostamolla tuotettu SNG paineistetaan maakaasuputkeen sopivaan paineeseen. Tämän jälkeen sen siirto onnistuu Gasum:n maakaasuverkkoa pitkin. Tällöin SNG:tä kohdellaan siirtokustannusten perusteella kuten maakaasua. Gasumilta saatujen tietojen perusteella kaasun siirtokustannukset liikkuvat välillä 4 – 10 €/MWh siirron keskihinnan ollessa noin 5,5 €/MWh. Kustannuslaskennan perustana on täten järkevää käyttää tätä keskiarvohintaa. Tällä hinnalla laskettuna kaasun siirrosta aiheutuvat vuotuiset kustannukset ovat noin 7,04 miljoonaa euroa. Siirron hinta tulee ottaa mukaan kustannustarkastelussa, sillä maakaasun referenssikustannuksiin (luku 4.4.1.5) on sisällytetty myös siirron osuus.

Jalostamon käytöstä aiheutuu myös muita juoksevia kuluja, joita on tässä vaiheessa vaikea tarkalleen määrittää. Arvio muiden kulujen määrästä on 1 prosentti vuotuisista pääomakuluista.

#### **4.4.1.5 SNG + KL tuotot**

SNG:n pääasiallinen käyttökohde tulisi olemaan fossiilisen maakaasun korvaaminen voimalaitoskäytössä. Jotta SNG:lle olisi kysyntää, on sen käytöstä aiheutuvien kustannustenkin oltava yhtäläiset maakaasun käytön kanssa. Toisin sanoen, maakaasun käytön aiheuttamia kokonaiskustannuksia voimalaitokselle voidaan pitää hintareferenssinä SNG:n ostohintaa mitoitettaessa. Maakaasun tuotantokustannukset ovat erittäin pienet verrattuna SNG:n tuotantokustannuksiin, joten suora hintakilpailu ei ole mahdollista. Maakaasun ollessa fossiilinen polttoaine, aiheutuu sen käytöstä kuitenkin voimalaitokselle lisäkustannuksia yhä enenevässä määrin verojen ja päästömaksujen muodossa. Tämä tasoittaa kustannuseroja fossiilisen kaasun ja biokaasun välillä huomattavasti, sillä SNG:n käytölle ei ole asetettu veroja tai päästömaksuja sen ollessa uusiutuva polttoaine. Tässä luvussa selvitetään, mikä olisi SNG:n mahdollinen ostohinta voimalaitoksella, joka haluaa korvata maakaasun käyttöä uusiutuvalla biokaasulla. Lisäksi arvioidaan ylijäämälämmöstä tuotetusta kaukolämmöstä saatava tuotto.

Pohjatietona hintatarkastelulle on maakaasun tukkutariffiin perustuva veroton kokonaishinta sisältäen maakaasuenergian sekä maakaasun siirron. Energiamarkkinaviraston tilaston viimeisimpien tilastojen perusteella tämä hinta on noin **36 – 42 €/MWh**. [55]

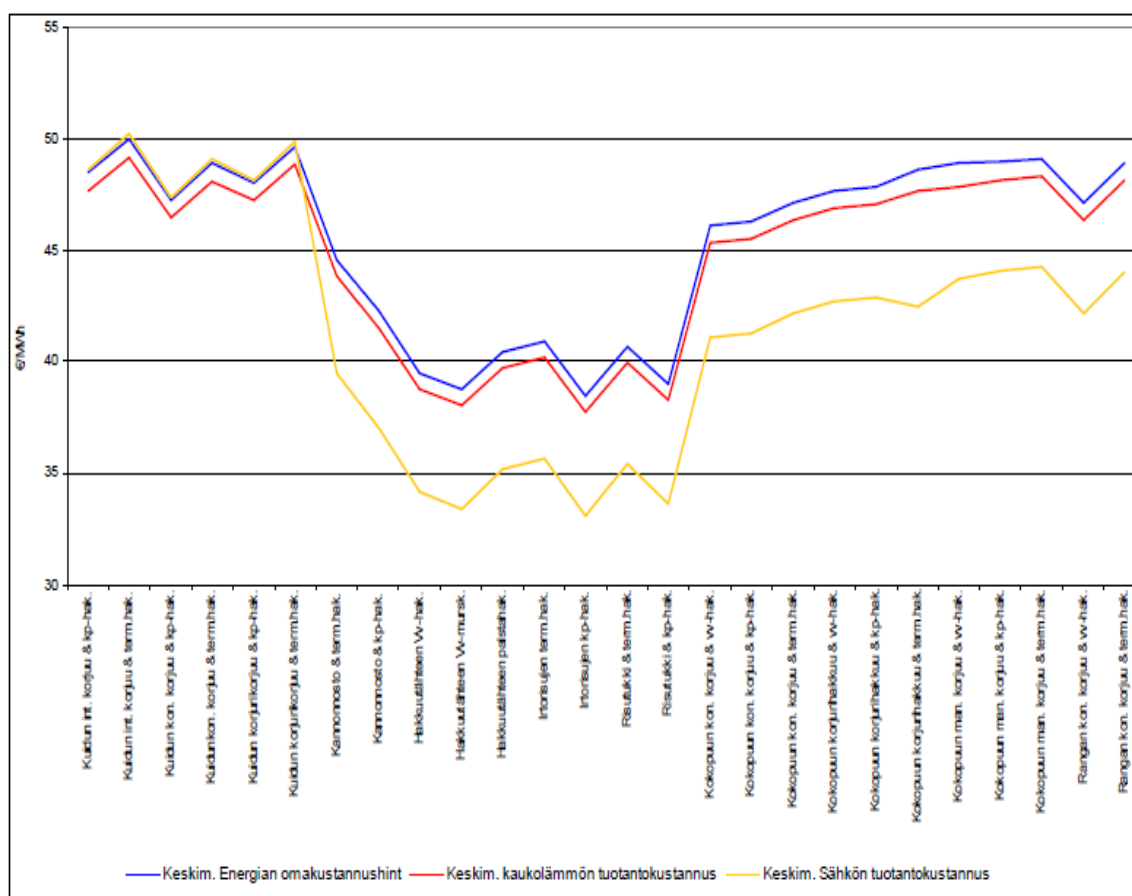
Maakaasun verot koostuvat energiasisältöverosta, hiilidioksidiverosta ja huoltovarmuismaksusta. Näiden suuruudet jakautuvat seuraavasti:

- Energiasisältövero: 1.1.2013 – 31.12..2014 5,5 €/MWh ja 1.1.2015 alkaen 7,7€/MWh
- Hiilidioksidivero: 5,94 €/MWh, säilyy toistaiseksi muuttumattomana
- Huoltovarmuismaksu: 0,084 €/MWh, säilyy toistaiseksi muuttumattomana [56]

Maakaasun käytön verot yhteensä 1.1.2015 hintatasolla ovat 13,724 €/MWh. Oletettavaa on, että verojen osuus tulevaisuudessa ei laske oleellisesti. Verot huomioon ottaen saadaan siis maakaasun hinnaksi **49,724 – 55,724 €/MWh**.

Maakaasun käyttöön polttoaineena EU:ssa liittyy vielä päästökaupasta aiheutuva kuluerä. Tämä riippuu puolestaan CO<sub>2</sub>-päästöoikeuden hinnasta. Olettamalla päästöoikeuden hinnaksi 20 €/tCO<sub>2</sub> ja käyttämällä CO<sub>2</sub>-päästökerrointa 220 kg/MWh, saadaan maakaasun käytön lisäkustannukseksi 4,4 €/MWh. [57] Tämä tarkoittaa maakaasun hintaan lisättynä **54,124 – 60,124 €/MWh**. On odotettavissa, että tulevaisuudessa CO<sub>2</sub>-päästöoikeuksien hinnat tulevat kasvamaan, jolla on suora vaikutus maakaasun kokonaishintaan ja näin ollen SNG:n maksukykyyn.

Ylijäämälämmöstä saatava kaukolämpö syötetään Merven tapauksessa Elenia Lämpö OY:n kaukolämpöverkkoon, joten kaukolämmön hinta tulee määrittää siten, että sen osto on kannattavaa Elenialle kaikissa tilanteissa ja vuodenaikoina. Elenian yhteistuotantoon käyttämät polttoaineet olivat vuonna 2011 pääasiassa maakaasu, turve sekä biomassa. [58] Tanja Ihalaisen tutkimuksen mukaan biopolttoaineilla yhteistuotetun kaukolämmön kustannukset jakautuvat taulukon 5 mukaisesti:



Taulukko 5. Sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannon kustannusanalyysi biopolttoaineita käytettäessä. Lähde: Tanja Ihalainen, Itä-Suomen Yliopisto, METLA [59]

Taulukosta 5 nähdään, että kaukolämmön keskimääräiset tuotantokustannukset CHP-tuotannossa biopolttoaineita käytettäessä ovat noin 38 - 50 €/MWh. Tällä perusteella voidaan olettaa Merven biojalostamolta myytävän keskimääräisen kaukolämmön hinnan olevan noin **30 - 35 €/MWh**. On huomioitavaa, että kaukolämmön vastaanottokyky Elenia Lämmön kaukolämpöverkossa on rajallista, joka on otettava huomioon jalostamon ylijäämälämmön osuuden kasvaessa esimerkiksi jalostamoa laajennettaessa.

#### 4.4.1.6 Kannattavuuden arviointi

Jalostamoinvestoinnin vuotuisten pääomakustannusten määrittämiseksi käytetään tässä työssä annuiteettimenetelmää, joka ottaa huomioon laitoksen pitoajan sekä korkotason vaikutuksen. Vuotuiset kustannuserät määritetään kertomalla kokonaisinvestointikustannukset annuiteettitekijällä  $c_{n/i}$ , joka saadaan kaavasta 3:

$$c_{n/i} = i \cdot (1+i)^n / (1+i)^n - 1, \quad (3)$$

jossa  $n$  on investoinnin pitoaika [a]  
 $i$  on laskentakorkokanta [%]

Seuraavaan taulukkoon on koottu vuotuiset pääomakustannukset laskettuna sekä 20 ja 25 vuoden laitoksen pitoajoilla sekä 5 ja 10 prosentin laskentakorkokannoilla. Kokonaisinvestointikustannuksen oletusarvona on käytetty 300 miljoonaa euroa. Vertailun vuoksi mukaan on otettu 40 % pienempi investointikustannus mahdollisen investointituen vaikutuksen hahmottamiseksi.

Investointikustannus [€]	Pitoaika [a]	Korkotaso [%]	Annuiteetti	Vuotuinen pääomakustannus [€]
300 000 000	20	10	0,11745962	35 237 887
300 000 000	25	10	0,11016807	33 050 422
300 000 000	20	5	0,08024259	24 072 776
300 000 000	25	5	0,07095246	21 285 737
180 000 000	20	10	0,11745962	21 142 732
180 000 000	25	10	0,11016807	19 830 253
180 000 000	20	5	0,08024259	14 443 666
180 000 000	25	5	0,07095246	12 771 442

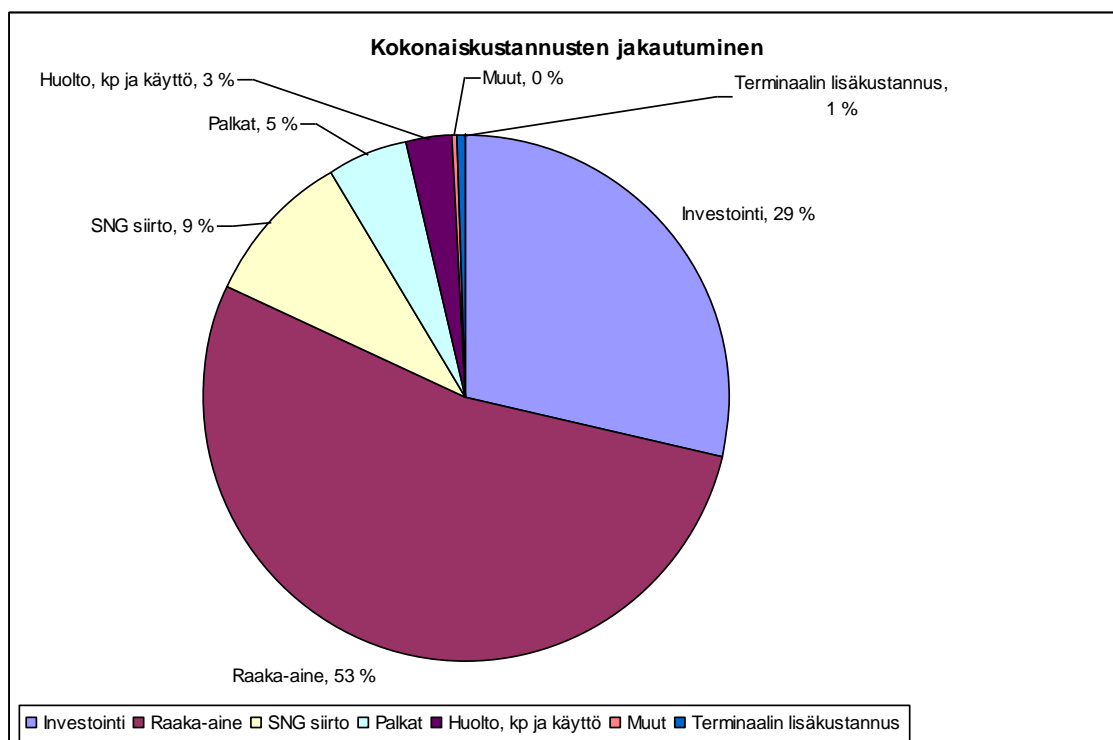
*Taulukko 6. Investointikustannusten vuotuinen jakautuminen*

Investointikulun lisäksi mukaan täytyy laskea biopolttoaineterminaalin rakentamisesta aiheutuva kustannuslisä, jonka suuruus 0,2 €/MWh. Tämä tarkoittaa 400 000 euron vuotuista investointikustannuslisää, jolla ei ole suurta merkitystä kannattavuuden kannalta.

Vuotuiset käyttökustannukset ovat nähtävillä taulukossa 7. Investointikustannuksen arvona on käytetty 300 miljoonaa euroa, pitoaikana 25 vuotta ja korkotasona 5 prosenttia. Muut käyttökulut perustuvat luvussa 4.4.1.4. esitettyihin arvoihin.

Käyttökustannukset			
	Yksikkökustannus [€/MWh]	Raaka-aineiden tarve [MWh/a]	Kustannus [€/a]
Raaka-aine	20	2 000 000	40 000 000
	Siirtokustannus [€/MWh]	SNG tuotanto [MWh/a]	
SNG siirto	6	1 280 000	7 040 000
	Henkilömäärä	Palkkakustannukset [€/a]	
Palkat	60	60 000	3 600 000
	Osuus vuotuisista pääomakustannuksista [%]	Vuotuinen pääomakustannus [€/a] (25v,5%)	
Huolto, kp, käyttö	10	21 285 737	2 128 574
Muut	1	21 285 737	212 857
<b>Yhteensä</b>			<b>52 981 431</b>

*Taulukko 7. Käyttökustannusten jakautuminen.*



*Kaavio 2. Kokonaiskustannusten prosentuaalinen jakautuminen. Investointikustannus 25v, 5% korko. Raaka-aine 20 €/MWh.*

SNG:n ja kaukolämmön tuotot keskiarvohinnoilla on koottu taulukkoon 8:

SNG ja kauko- lämmön tuotto			
	myyntihinta [€/MWh]	tuotantomäärä [MWh/a]	Tuotto [€/a]
SNG	56	1 280 000	71 680 000
Kaukolämpö	33	280 000	9 240 000
<b>Yhteensä</b>			<b>80 920 000</b>

*Taulukko 8. SNG ja kaukolämmön myyntituotot.*

Jalostamo on kannattava, mikäli vuotuiset tuotot ovat yhteenlaskettuja investointi- ja käyttökustannuksia suuremmat seuraavan kaavan mukaisesti:

$$T_{\text{sng}} + T_{\text{kl}} - P \cdot c_{n/i} - K_{\text{ter}} - K_{\text{käyttö}} > 0, \quad (4)$$

jossa

- $T_{\text{sng}}$  on SNG:n myyntituotto [€]
- $T_{\text{kl}}$  on kaukolämmön myyntituotto [€]
- $P$  on jalostamon kokonaisinvestointi [€]
- $c_{n/i}$  on annuiteettitekijä
- $K_{\text{ter}}$  on terminaalin rakentamisesta aiheutuva kustannuslisä [€]



$K_{\text{käyttö}}$  on vuotuinen käyttökustannus [€]

Merven kaltaisen biojalostamon rakentamiselle on mahdollisuus saada Suomen valtiolta sekä EU:lta investointitukea. Taulukkoon 9 on koottu 5 esimerkkitapausta investoinnin kannattavuuden ja mahdollisen investointituen vaikutuksen hahmottelemiseksi.

- Tapaus 1 on worst case scenario, jossa investoinnin pitoaika on 20 vuotta, korko 10 % ja investoinnille ei ole saatu tukea. Myyntituotot ovat SNG:lle 56 €/MWh, ja kaukolämmölle 33 €/MWh.
- Tapaus 2 käsittää 25 vuoden pitoajan investoinnille, 5 % korkotason sekä 20 % investointituen. Myyntituotot ovat SNG:lle 56 €/MWh, ja kaukolämmölle 33 €/MWh.
- Tapaus 3 on myös 25 vuoden pitoajalla ja 5 % korolla, mutta ilman investointitukea. Myyntituotot ovat SNG:lle 60 €/MWh, ja kaukolämmölle 35 €/MWh.
- Tapaus 4 on best case scenario, 25 vuoden pitoaika, 5 % korkotaso, 40 % investointituki. Myyntituotot ovat SNG:lle 60 €/MWh, ja kaukolämmölle 35 €/MWh.
- Tapaus 5: Keskiarvotilanne. 20v pitoaika, 10 % korkotaso, 20% investointituki, Myyntituotot ovat SNG:lle 56 €/MWh, ja kaukolämmölle 33 €/MWh.

Raaka-aineen hinta kaikissa tapauksissa on 20 €/MWh. Terminaalin rakennuskustannuslisiä ei ole huomioitu sen ollessa kaikissa sama, ja arvona pieni.

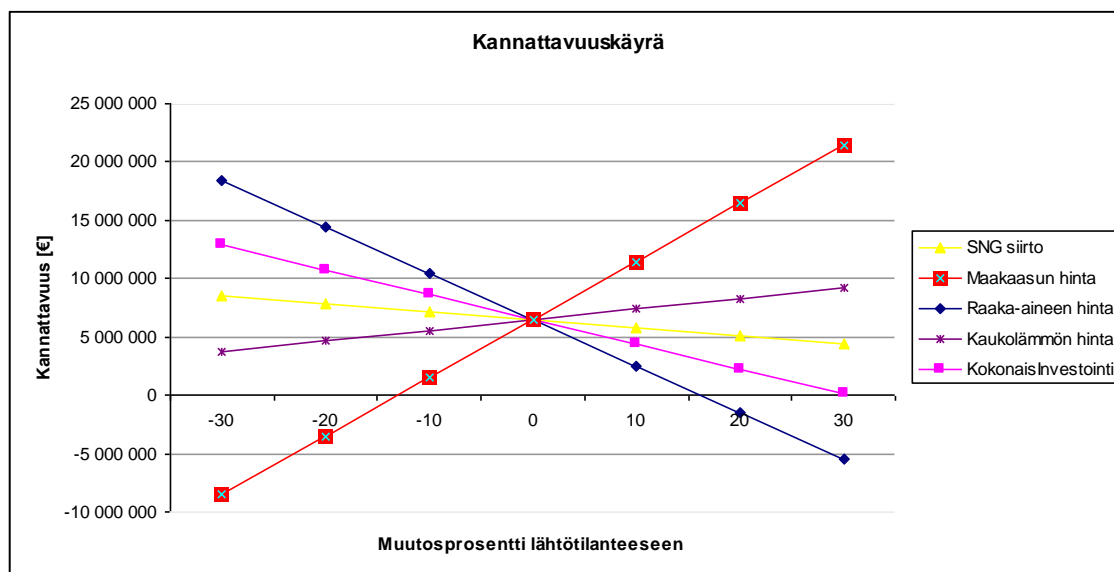
	SNG tuotto	KL tuotto	Pääomakustannus	Käyttökustannukset	Tulos
Tapaus 1	71 680 000	9 240 000	35 237 887	54 516 167	-8 834 054
Tapaus 2	71 680 000	9 240 000	17 028 590	52 513 144	11 378 266
Tapaus 3	76 800 000	9 800 000	21 285 737	52 981 431	12 332 832
Tapaus 4	76 800 000	9 800 000	12 771 442	52 044 858	21 783 700
Tapaus 5	71 680 000	9 240 000	28 190 310	53 740 934	-1 011 244

*Taulukko 9. Esimerkkitapaukset investoinnin kannattavuudesta ja investointituen vaikutuksesta.*

Edellisestä taulukosta nähdään, että tapauksissa 2, 3 ja 4 jalostamon toiminta on kannattavaa, erityisesti 40 % investointituella. Investointituen merkitys kannattavuudelle onkin erittäin suuri. Tapauksessa 3 jalostamon toiminta olisi kannattavaa investointituen puuttuessaakin.

#### 4.4.1.7 Kriittiset muuttujat

Edellisen kohdan taulukoiden perusteella voidaan hahmottaa jalostamoinvestoinnin kannattavuuteen vaikuttavat kriittisimmät muuttujat, kun oletetaan laitoksen toimintakapasiteetin pysyvän muuttumattomana. Nämä muuttujat ja niiden vaikutus kokonaiskannattavuuteen on nähtävissä kaaviossa 3. Jokaiselle muuttujalle tehty muutokset 10 prosentin välein alkutilanteesta on mallinnettu omana käyränä.



Kaavio 3. Kriittisten muuttujien vaikutus kannattavuuteen.

Kaavion 0-tilanteessa käytössä seuraavat arvot:

- Maakaasun hinta 39 €/MWh (Maakaasun hintaa käytetty vertailussa SNG hinnan sijasta, sillä verojen ja päästömaksujen osuus on oletettu säilyvän muuttumattomana)
- SNG siirto 5,5 €/MWh
- Raaka-aine 20 €/MWh
- Kaukolämmön myyntihinta 33 €/MWh
- Kokonaisinvestointi 300 M€ (25v pitoaika, 5 % korkotaso)
- Laskennassa ei ole otettu huomioon kunnossapidon ja huollon kustannusten muutoksia pääomakustannusten muuttuessa, sillä niiden osuus on vertailussa pieni.

#### 4.4.1.8 Omakustannushinta ja puun hankinnan rajahinnat

Yksi tämän työn päätarkoituksista oli selvittää rajahinnat raaka-ainepuulle. Rajahintojen muodostamiseksi on tehtävä seuraavat oletukset:

- Investointikustannus 300 M€, pitoaika 25v, korkotaso 5 %, ei investointitukea
- SNG siirtohintaa 5,5 €/MWh
- Kaukolämmön myyntihinta on kiinteä 33 €/MWh ( oletetaan sisältyvän omakustannushintaan)
- SNG **omakustannushinta** vaihtelee **40 – 55 €/ MWh**

Raaka-ainepuun porttihinnaksi muodostuu tällöin **13,09 – 22,7 €/MWh**.

Vastaava tapaus 40 % investointituen kanssa antaa puun raja-hankintahinnaksi **17,8 – 27,4 €/MWh**.

Nämä rajahinnat on saatu aikaan käyttämällä perustana omakustannushintoja. Todellisuudessa olisi otettava vielä huomioon mahdollinen voittomarginaali, esimerkiksi 5 %. Tämä tarkoittaisi SNG:n myyntihintana **42 – 57,75 €/MWh**, joka on edelleen linjassa aiempien ennusteiden mukaisiin SNG:n myyntihintoihin verrattuna.

#### 4.4.1.9 Tulokset ja yhteenveto

Edellisen luvun tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että SNG jalostamo saadaan kannattavaksi tiettyjen kriittisten tekijöiden loksauttaessa kohdilleen. Kaaviossa 3 on hahmotettu kannattavuuteen eniten vaikuttavia muuttujia. Näitä ovat maakaasun hinta, joka toimii SNG hinnan referenssinä, raaka-aineen hinta, sekä investointikustannuksen suuruus. Lisäksi lievästi kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat kaukolämmön myyntihinta, sekä SNG siirtohintaa. Näillä ei kuitenkaan ole suurta vaikutusta kannattavuuteen, mikäli kolme kriittisintä tekijää otetaan huomioon. Vielä vähemmän merkitystä kokonaiskannattavuudelle oli muilla käyttökustannuksilla, joten näiden syvällisemmälle tarkastelulle ei tässä vaiheessa ole vielä tarvetta.

Tämän lisäksi todettiin, että investoinnin pitoajalla, sekä korkotasolla on suuri merkitys kannattavuuteen. Taulukossa 9 hahmoteltiin mahdollisen investointituen vaikutusta kannattavuuteen, ja kävi selväksi, että sen merkitys on erittäin oleellinen kannattavuuden kannalta. Samassa taulukossa todettiin myös, että jalostamo on mahdollista saada kannattavaksi ilman investointitukea, mikäli muut kriteerit osuvat optimaalisesti kohdalleen.

Vertailun vuoksi on mainittava, että ECN:n arvion mukaan suuren SNG-jalostamon vuotuiset kokonaistuotantokustannukset ovat noin 42 €/MWh<sub>sng</sub> ilman investointitukia. Kun otetaan huomioon arvioitu SNG:n myyntihinta, eli 54 - 60 €/MWh, olisi jalostamo tällöinkin kannattava. [52]

Yhteenvedona voidaan kannattavuuden osalta todeta, että SNG jalostamoa voidaan pitää houkuttelevana investointina, etenkin kun otetaan huomioon yhä kiristyvät päästömaksut sekä fossiilisten polttoaineiden käytön jatkuvasti nousevat kustannukset. Nämä yhdessä vaikuttavat positiivisesti SNG jalostamon kannattavuuteen.

Merven teollisuusalue soveltuisi erittäin hyvin SNG-jalostamon tarpeisiin, sen läheisyydessä sijaitsevien kulkuyhteyksien sekä maakaasu- ja kaukolämpöverkkojen läheisyyden kannalta. Huomioitavaa tosin on, että laitoksen kokoluokan suurentuessa kaukolämmön vastaanottokyky on rajallinen, jolloin ylijäämälämmölle on löydettävä muita käyttökohteita, esimerkiksi pienimuotoinen sähköntuotanto höyryturbiinilla, sekä mahdollisesti prosessihöyryn tarjoaminen muulle lähialueella toimivalle teollisuudelle.

Jalostamon laajennusmahdollisuuksia voisi tämän konseptin puitteissa olla myös esimerkiksi integroitu nestemäisen typen valmistaminen, hiilidioksidin talteenotto eli CCS sekä synteetikaasun hyödyntäminen muiden jalosteiden, esimerkiksi biodieselin tai biobensiinin, valmistuksessa. [48]

SNG jalosteena omaa erittäin hyvät ominaisuudet. Sen erityisinä vahvuuksina voidaan pitää soveltuvuutta sekä voimalaitos- että liikennekäyttöön. Lisäksi maakaasuverkoston hyödyntäminen SNG:n jakelussa on suuri etu verrattuna muihin biojalosteisiin, jotka vaativat logistiikan osalta huomattavasti enemmän panostusta.

Investoinnin kannalta epävarmuuksia herättää tässä vaiheessa SNG-teknologian kehityksessä, ja tämän johdosta sen luotettavuus. Erityisesti kaasutusta seuraava kaasunpuhdistus on edelleen hankalaa ja kallista, jonka johdosta se on suuren kehitystyön alla. Teknologia on demonstroituvaiheessa, joten sen täydelliselle toiminnalle on vaikea asettaa takeita. Toisaalta taas kaupalliseen demonstrointilaitokseen olisi perusteltumpaa hakea investointitukea, jolla on suuri vaikutus laitoksen kannattavuuteen.

Toinen investointihalua hillitsevä seikka on kokonaisinvestoinnin suuruus. SNG valmistukseen tarvittava laitteisto on erittäin kallis, joten sen toteuttamiseksi vaaditaan stabiileja olosuhteita ja sitoutumista niin investoivan tahon, kuin valtion kannalta. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttavien poliittisten päätösten tulee olla pitkäkestoisia, jotta biojalostamon kaltainen suuri investointi on mahdollista. Tämän hetkisen Suomen valtion Energia- ja Ilmastostrategian mukaiset tavoitteet puoltaisivatkin SNG-jalostamon rakentamista. Tulevaisuuden poliittisten päätösten vaikutuksia biojalostamoinvestointiin käydään läpi lisää luvussa 5.1.

#### 4.4.2 Torrefiointi

Torrefiointia kehitetään tällä hetkellä erittäin paljon eri puolilla maailmaa, ja torrefioitun puun ja pelletin markkinat saattavat kasvaa huomattavasti tulevaisuudessa. Sen potentiaali kivihiilen mahdollisena korvaajana on erittäin suuri, joten sen valinta tähän vertailuun oli järkevää. Torrefiointi on tekniikkana SNG:n tuotantoa yksinkertaisempaa, mutta torrefioitun puun tämän hetkinen potentiaalinen myyntihintakin eroaa suuresti SNG:stä pyydetävissä olevasta hinnasta, joten suora vertailu investointikustannusten perusteella ei ole järkevää. Tässä luvussa käydään läpi Merveen sopivan torrefiointilaitoksen prosessin pääpiirteet sekä arvioidaan mahdollisen laitoksen kannattavuutta nykyisen tietämyksen pohjalta. Referenssiteknologiana käytetään Andritz:n ja ECN:n kehittämää torrefiointiteknologiaa, joka on tällä hetkellä kaupallisessa vaiheessa. Kyseinen konsepti on suunniteltu ennen kaikkea suurelle tuotantokapasiteetille, joka tulisi kyseeseen Mervenkin tapauksessa. Oletuksena on 1 miljoonan kuution puuraaka-aineen saanti, joka vastaa energiasisällöltään noin 2 TWh:a.

##### 4.4.2.1 Torrefiointiprosessin kulku

Torrefiointiprosessissa Merveen tuotava puubiomassa haketetaan ja kuivataan, ja tämän jälkeen torrefioidaan. Torrefioitu puu pelletöidään energiatiheyden kasvattamiseksi. Valmis pelletti kuljetetaan juna / rekkakuljetuksina esimerkiksi tolkkisten satamaan, josta se jatkaa matkaansa meriteitse polypolttolaitoksiin Suomeen sekä ulkomaille.

##### *Esikäsittely*

Torrefiointiprosessin esikäsittely tapahtuu samalla tavalla kuten kaasutusprosessia edeltävässä vaiheessa. Puun haketetaan, jonka jälkeen se kuivataan luonnonkuivasta (35 - 40 % kosteutta) aina noin 15 prosentin kosteuteen asti kuivurissa. Kuivuri hyödyntää torrefiointiprosessista saatavaa ylijäämälämpöä. Kuivauksen jälkeen hake syötetään torrefiointireaktoriin.

##### *Torrefiointi*

Torrefiointiprosessissa puu käy läpi luvussa 3.2.3.1. kuvatut vaiheet. Torrefiointiin kuuluu myös jäähdytysvaihe, joka on toteutettava inerteissä olosuhteissa syttymis- ja räjähdysvaaran minimoimiseksi. Raaka-ainepuun energiasisällöstä noin 10 % poistuu haihtuvina aineina, jotka voidaan käyttää hyödyksi prosessin tarvitseman lämmön tuotantoon.

lämpökattilassa. Torrefiointireaktori on liikkuva peti–tyyppinen ja se toimii paineistetuissa, hapettomissa olosuhteissa.

### ***Lämmön tuonti***

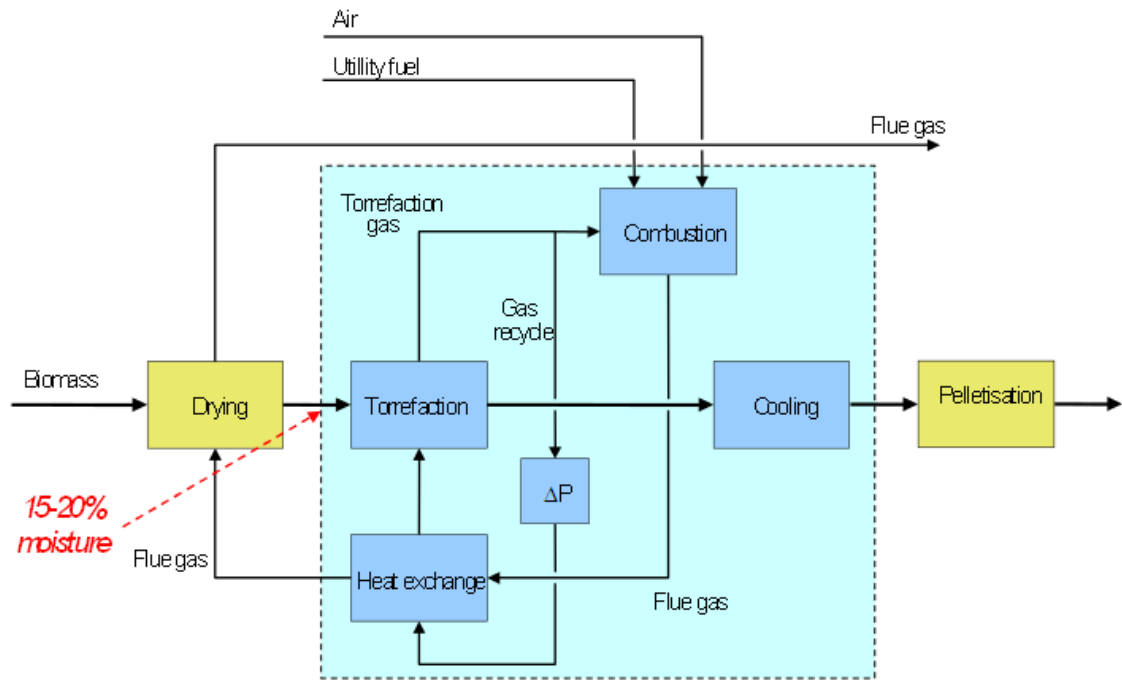
Torrefiointireaktion vaatima lämpö tuotetaan lämpökattilassa, jossa polttoaineena toimii torrefiointireaktiosta saatavien haihtuvien aineiden muodostaman kaasun lisäksi metsähake tai vaihtoehtoisesti maakaasu. Poltosta saatava lämpöenergia siirtyy savukaasuihin, jotka johdetaan lämmönvaihtimeen. Lämmönvaihtimessa osa savukaasujen lämpöenergiasta siirretään paineistettuun torrefiointikaasuvirtaan, jota kierrätetään torrefiointireaktorin ja lämmönvaihtimen välillä. Näin lämpöenergia saadaan tuotua suoraan torrefiointireaktioon. Lämmönvaihtimesta poistuvat savukaasut sisältävät edelleen lämpöenergiaa, joka puolestaan hyödynnetään kuivurin lämmön tarpeen tyydyttämiseksi. Kuivurin vaatima lämmön tarve riippuu raaka-aineen kosteusprosentista. Optimitilanteessa torrefiointiprosessi voisi olla autoterminen, eli polttokattilassa ei tarvitsisi polttaa apupolttoaineita, eli maakaasua tai haketta. On kuitenkin mahdollista, että prosessiin saatavan raaka-aineen kosteuspitoisuus vaihtelee, jolloin kuivurin lämmön tarpeen muutoksia voidaan kompensoida kattilassa poltettavalla apupolttoaineella.

### ***Pelletöinti***

Torrefioidun puun tai pelletin jälkeen torrefioitu puu jauhetaan pieneen kokoon ja pelletöidään tai briketöidään energiatiheyden parantamiseksi, jolla on suotuisa vaikutus logistiikkakustannuksiin. Pelletöinnin avulla saavutetaan myös tasalaatuisempi loppujaloste. Pelletöinti tapahtuu luvussa 3.4 kuvatulla tavalla.

### ***Varastointi***

Torrefioidun puun tai pelletin yksi vahvuuksista on sen hydrofobisuus. Materiaali ei siis ime itseensä vettä kovin helposti, ja sen varastointi onnistuukin lähes kivihiilen tapaan. Varastointi voi tapahtua esimerkiksi ulkokatoksessa, toisin kuin tavallisen pelletin tapauksessa. Varastointi tulisi Merven tapauksessa olemaan mahdollisimman tilapäistä jalostamoalueella, ja kuljetus joko juna- tai rekkakuljetuksina tapahtuisi optimitilanteessa lähes välittömästi torrefiointiprosessin jälkeen. Logistiikkaketjussa aiheutuvien ongelmien varalta jalostamoalueella tulisi olla kuitenkin puskurivarasto myös valmiita jalosteita varten.



Kuva 12. Torrefiointiprosessin kulku. Lähde ECN. [60]

#### 4.4.2.2 Torrefiointilaitoksen perustiedot

Taulukkoon 10 on koottu Merven mittakaavan torrefiointilaitoksen ominaisluvut. Apu-polttoaineena käytetään metsähaketta, jonka kulutus on huomioitu laitoksen raaka-aineen kulutuksessa. TOP tarkoittaa jalostuksen lopputuotetta, eli torrefioitua pellettiä.

Raaka-aine sisään (40% kosteus)	900 000 m <sup>3</sup>
Raaka-aineen energiasisältö	2 TWh
Kuivan raaka-aineen lämpöarvo	18 MJ/kg
Vuotuiset käyttötunnit	8000
Lämpökattilan polttoaineen käyttö	200GWh
Torrefiointiyksikön teho	225 MW
Torrefioinnin hyötysuhde	90 %
Laitoksen kokonaishyötysuhde	80 %
TOP -saanto GWh / a	1620 GWh/a
TOP lämpöarvo	22 MJ/kg
TOP saanto t / a	265000 t

Taulukko 10. Torrefiointilaitoksen ominaisluvut.

#### 4.4.2.3 Investointikustannukset

Torrefiointi on teknologiana kaupallistumisen kynnyksellä, ja pienen kokoluokan demonstraatiolaitoksia on rakennettu. Esimerkkinä voidaan mainita Topell:n ja RWE Innogyn yhteistyössä rakentama torrefiointilaitos Hollannin Duiven:ssa. Tämän laitoksen tuotantokapasiteetti on 60 000 tonnia vuodessa. Laitoksen kokonaisinvestointikustannuksiksi oli arvioitu noin 15 miljoonaa euroa. [61]

ECN on tehnyt myös oman arvionsa 56 000 tonnin kapasiteetin omaavan torrefioitua pellettiä valmistavan laitoksen investointikustannuksista. Tämän arvion mukaan investointikustannukset olisivat luokkaa 7,5 miljoonaa euroa. [62]

Topell energy on tehnyt oman arvionsa 100 000 tonnia vuosikapasiteetin omaavasta torrefiointilaitoksesta. Tämän mukaan kokonaisinvestointikustannukset olisivat 28 miljoonaa dollaria. [63]

Merven konsepti on edellä mainittujen arvioiden laitoksia huomattavasti suurempi sen tuotantokapasiteetin ollessa noin 260 000 tonnia vuodessa. Tämän kokoluokan torrefiointilaitosta ei ole tähän mennessä rakennettu, joten jalostamolaitteiston kokonaisinvestointikustannuksesta ei ole olemassa referenssejä. Edellä mainittujen esimerkkien perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että investointikustannukset liikkuisivat noin 70 – 100 miljoonan euron haarukassa. Merven jalostamon investointikustannukseksi oletetaan 80 miljoonaa euroa.

Jalostamoalueen yhteydessä sijaitsevan terminaalin aiheuttamien kustannusten muodostuminen arvioidaan samoin, kuin edellisen luvun SNG-jalostamon tapauksessa, jolloin terminaalin investointikustannukset voidaan lausua kustannuslisänä raaka-aineen hinnassa, eli 0,2 €/MWh. Tästä muodostuu siis vuotuinen 400 000 € kustannus.

#### 4.4.2.4 Muuttuvat kustannukset

Suuren osan käyttökustannuksista muodostavat raaka-ainekustannukset, joiden porttikustannuksiksi oletetaan 20 €/MWh samoin, kuin SNG-jalostamon tapauksessa. Tähän summaan on sisällytetty logistiikkakustannukset jalostamolle asti. Torrefiointilaitoksen tapauksessa kuitenkin myös valmiiden jalosteiden kuljettaminen vaatii suuren kapasiteetin. Tästä syntyy edelleen kuluerä, joka vaikuttaa TOP-pelletin hintaan. Tätä kustannusta ei kannata sisällyttää tuotantokustannuksiin, vaan se otetaan huomioon myöhemmin skenaariotarkastelussa luvussa 4.4.2.8.



Henkilöstökustannukset voidaan arvioida samoin kuin SNG-jalostamon tapauksessa, eli yhteensä 60 henkilöä työllistyi laitoksessa. Kokonaiskuluiksi per henkilö arvioidaan 60 000 euroa vuodessa.

Torrefiointilaitos tuottaa tarvitsemansa lämmön hakkeella, joka on otettu huomioon tarvittavassa kokonaisraaka-aine määrässä. Se tarvitsee kuitenkin toimintaansa varten sähköä, joka ostetaan verkosta. ECN:n arvion mukaan 56 000 tonnin torrefiointilaitos tarvitsee sähkötehoa noin 1 MW edestä, joten voidaan arvioida Merven laitoksen tarpeiksi noin 6 MWe. Laitoksen käyttötunnit ovat vuodessa 8000 h, joten sähkön tarve on yhteensä 48 GWh. Energiamarkkinaviraston taulukoiden mukaan keskisuuren teollisuuslaitoksen sähkön siirtohintaa oli 1.3.2013 noin 3 snt/kWh. Sähköenergian hinta ei energiaviraston taulukoissa ole päivitetty teollisuuden osalta vuoden 2006 jälkeen, mutta suhteuttamalla yleiseen sähköenergian hintatasoon nousuun voidaan arvioida sähköenergian hinnaksi noin 7,5 snt/kWh. Yhteensä siis noin 10 snt/kWh. Sähkönkulutuksen kokonaishinnaksi saadaan täten 4 800 000 euroa vuodessa. [64]

Huolto-, kunnossapito- sekä muiden käyttökustannusten osuudeksi voidaan laskea tässäkin tapauksessa noin 10 prosenttia vuotuisista pääomakustannuksista.

#### 4.4.2.5 Torrefioidusta puusta maksukyky

Torrefioidun puun pääasialliset käyttökohteet ovat, kuten aiemmin työssä on todettu, sähkö ja lämmön yhteistuotantolaitosten polypolttokattiloissa kivihiilen korvaajana. Näin ollen arvioitaessa torrefioidun puun mahdollista myyntihintaa on tarkasteltava kivihiilen kustannuksia voimalaitoksilla.

Kivihiilen hinta oli vuonna 2011 13 €/MWh. IEA on arvioinut, että kivihiilen hinta olisi vuonna 2020 noin 10 €/MWh. On järkevää käyttää tätä arvoa myös laskelmien pohjana. [12]

Kivihiilen verot muodostuvat seuraavasti:

- Energiasisältövero 47,1 €/t
- Hiilidioksidivero 84,43 €/t
- Huoltovarmuusmaksu 1,18 €/t
- Yhteensä **132,71 €/t**. Kivihiilen lämpöarvolla **28 MJ/kg** tämä vastaa noin **17 €/MWh**. [65]

Verojen lisäksi on otettava huomioon päästökaupan aiheuttamat lisäkustannukset. Yhtäläisyyden vuoksi käytetään CO<sub>2</sub>-päästöoikeuden hintana 20 €/t<sub>co2</sub> kuten SNG-jalostamon tarkasteluissakin, vaikkakin IEA:n ennusteen mukaan päästöoikeuden hinta

voisi olla vuonna 2020 jopa 30 €/t<sub>co2</sub>. [12] Käytettäessä CO<sub>2</sub>-päästökerrointa 220 kg/MWh, saadaan päästöoikeuksien aiheuttamiksi lisäkustannuksiksi 4,4 €/MWh. Tämän johdosta kivihiilen hinnaksi voimalaitokselle muodostuisi **31,4 €/MWh**.

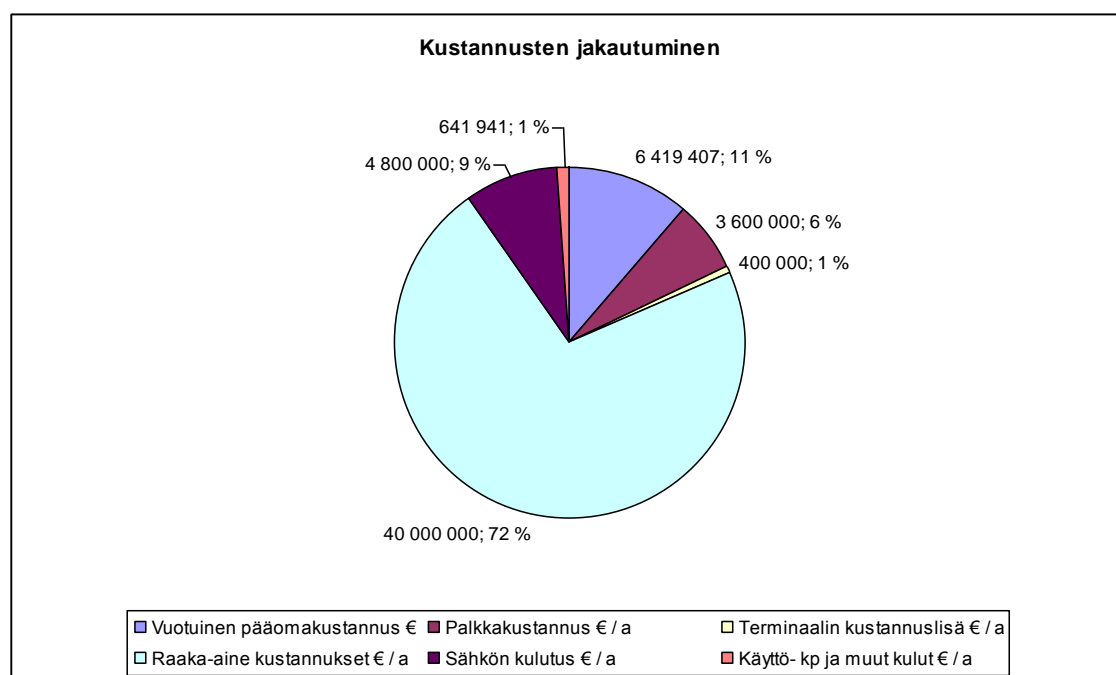
Referenssinä todettakoon, että joulukuussa 2012 kivihiilen hinta valmisteveroineen (ALV 0 %) oli noin 29 € / MWh. [66]

#### 4.4.2.6 TOP-pelletin kokonaistuotantokustannukset

Vuotuiset investointikustannukset lasketaan annuiteettimenetelmällä käyttäen laitoksen pitoaikana 20 vuotta ja korkotasona 5 prosenttia. Investointikustannuksissa ei ole otettu huomioon mahdollisen investointituen vaikutusta.

Investointikustannus €	80 000 000
Annuiteetti (20v 5%)	0,0802426
Vuotuinen pääomakustannus €	6 419 407
Palkkakustannus € / a	3 600 000
Terminaalin kustannuslisä € / a	400 000
Raaka-aine kustannukset € / a	40 000 000
Sähkön kulutus € / a	4 800 000
Käyttö- kp ja muut kulut € / a	641 941
<b>Yhteensä € / a</b>	<b>55 861 348</b>

*Taulukko 11. Torrefioidin vuotuiset kokonaiskustannukset*



*Kaavio 4. Torrefioidin kustannusten jakautuminen.*

Kaaviosta 4 nähdään, että raaka-ainekustannukset muodostavat torrefioinnin tapauksessa suurimman osan kokonaiskustannuksista.

#### 4.4.2.7 Torrefioidun puun tuotot

Torrefioidun pelletin saanto vuodessa on noin 265 000 tonnia. Energiasisältönä tämä vastaa noin 1620 GWh:a. Taulukossa 12 on hahmoteltu laitoksen kannattavuutta eri TOP-pelletin myyntihinnoilla.

Vuotuiset kustannukset €	TOP-myyntihinta €/MWh	TOP tuotot €	Tuotot - Kustannukset €
55 861 348	30	48600000	-7 261 348
55 861 348	35	56700000	838 652
55 861 348	40	64800000	8 938 652
55 861 348	50	81000000	25 138 652

*Taulukko 12. TOP-pelletin myyntihinnan vaikutus kannattavuuteen.*

Taulukosta 12 nähdään, että TOP-pelletin mahdollinen myyntihinta vaikuttaa erittäin vahvasti kokonaiskannattavuuteen. **Omakustannushinnaksi** TOP-pelletille kyseisillä lähtöarvoilla muodostuu noin **34,5 €/MWh**.

Torrefioidun puun kuljetuskustannukset vaikuttavat myös jalosteesta maksettavissa olevaan hintaan. VTT:n arvion mukaan 500 kilometrin vesi- tai rautatiekuljetus vaikuttaa jalosteen hintaan noin 5 € / MWh. [12] Voidaan siis arvioida, että jalosteiden kuljetus Mervestä junalla, tai rekka-autoilla rannikolle pölypolttolaitoksiin voisi vaikuttaa noin 2-3 €/MWh jalosteiden hintaan.

#### 4.4.2.8 Skenaariotarkastelu

Torrefioinnin kustannusten jakautumisen, sekä tuottojen muodostumisen perusteella voidaan nähdä, että suurimmat laitoksen kannattavuuteen vaikuttavat tekijät ovat raaka-aineen hinta, sekä TOP-pelletin myyntihinta. Torrefioidun materiaalin myyntihinnan muodostuminen sisältää runsaasti epävarmuuksia, koska markkinat ovat tällä hetkellä käytännössä olemattomat. Niinpä tulevaisuudessa voi TOP-pelletin myyntihinnassa tapahtua suuriakin vaihteluita.

Skenaariotarkasteluun on valittu 3 hypoteettista tilannetta torrefiointilaitoksen kannattavuuden hahmottelemiseksi:

Skenaario 1, ”best case scenario”:

- Investointikustannuksiin on saatu 40 prosentin tuki
- Raaka-aineen porttihinta 19 €/MWh
- TOP-pelletin kuljetuskustannukset ovat 2 €/MWh
- TOP-pelletin myyntihinnaksi on muodostunut 42€/MWh (Kuljetuskustannukset vähennettynä 40 €/MWh)
- Muut muuttuvat kustannukset ovat edellisten arvioiden mukaiset

Skenaario 2

- Investointituki 20 prosenttia
- Raaka-aineen kuljetuskustannukset oletettua suuremmat, porttihinta 22 €/MWh
- TOP-pelletin kuljetuskustannukset 2 €/MWh
- TOP-pelletin myyntihinta 39 €/MWh (Kuljetuskustannukset vähennettynä 37 €/MWh)
- Muut muuttuvat kustannukset kuten skenaario 1

Skenaario 3, ”worst case scenario”

- Ei investointitukea
- Raaka-aineen kustannukset 25 €/MWh
- TOP-pelletin kuljetuskustannukset 3 €/MWh
- TOP-pelletin myyntihinta 38 €/MWh (Kuljetuskustannukset vähennettynä 35 €/MWh)
- Muut muuttuvat kustannukset kuten skenaario 1

	Kustannukset	Tuotot	Lopputulos
Skenaario 1	49 036 809	64 800 000	15 763 191
Skenaario 2	62 449 078	59 940 000	-2 509 078
Skenaario 3	65 861 348	56 700 000	-9 161 348

*Taulukko 13. Skenaariotarkastelun tulokset.*

#### 4.4.2.9 Yhteenveto ja ajatuksia

Edellisen luvun tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että torrefiointilaitos voidaan saada kannattavaksi. Tämä kannattavuus on kuitenkin suuresti sidoksissa TOP-pelletin myyntihintaan, sekä raaka-aineesta maksettavaan hintaan. Torrefioidun materiaalin markkinat voivat kehittyä nopeastikin, ja mahdollista myyntihintaa on tässä vaiheessa vaikea arvioida. Oletuksena hinta on kuitenkin osittain sidottu kivihiilen hintaan, ja suuret vaihtelut kivihiilen hinnassa tuntuisivat suoraan myös torrefioidun pelletin hinnassa.

Torrefiointi voidaan edellisten laskelmien perusteella saada joissain tapauksissa kannattamaan ilman valtion tukitoimia, mutta mahdollisista tuista olisi suurta hyötyä inves-

toinnin houkuttelevuuden kannalta, sillä kyseessä on kuitenkin suhteellisen kallis ja tässä kokoluokassa koettelematon teknologia. Investointituen lisäksi suuri vaikutus voimalaitosten jalosteista maksukykyyn, ja sitä kautta jalostamoinvestoinnin kannattavuuteen, olisi biopolttoaineille suunnatusta sähkön ja lämmön tuotantotuesta vastaavalla tavalla kuin metsähaketta polttoaineenaan käyttävillä CHP-laitoksilla.

Torrefiointiteknologian voidaan katsoa olevan pienessä mittakaavassa kaupallisella tasolla, ja teknologian toimivuuteen ei liity niin suuria epävarmuuksia, kuin SNG-jalostamon tapauksessa. Torrefoidun puun soveltuminen kivihiilen korvaajaksi pölypolttokattiloissa herättää kuitenkin tässä vaiheessa kysymyksiä. Epävarmuudet liittyvät mahdolliseen korvausosuuteen, sekä torrefoidun puun sisältämien alkalimetallien käyttäytymiseen, kun kivihiiltä on tarkoitus korvata suurina määrinä. Alkalimetallit voivat aiheuttaa korroosiota laitoksen tulistinpinoilla, joten voi olla, että torrefoidun puun soveltuminen polttoaineeksi on rajallista. Nämä seikat voivat vaikuttaa torrefoidun puun markkinoiden kehitykseen huomattavasti, joten ne ovatkin tällä hetkellä intensiivisen tutkimuksen alla useilla tahoilla. Alkali-epäsuotuisia vaikutuksia voisi tulevaisuudessa mahdollisesti torjua esimerkiksi TOP-pelleteihin lisätyillä kemikaaleilla tai tuhalla.

Torrefoidulle puulle on maailmanlaajuisesti olemassa kuitenkin valtava potentiaali kivihiilen korvaajana pölypolttokattiloissa pieninäkin seososuuksina. Esimerkkinä mainittakoon, että 5 prosentin korvausosuudella koko Euroopan kivihiiltä polttavissa pölypolttokattiloissa tämä tarkoittaisi 588 miljoonaa GJ:a vuodessa, eli noin 163 TWh. [67] Suomessa kivihiilen kulutus rannikon suurissa pölypolttokattiloissa on ollut viime vuosina noin 14 TWh [12]. Torrefoidulle puulle löytyy siis potentiaalisia käyttökohteita Suomestakin runsaasti.

Suuren kokoluokan torrefiointilaitoksen sähkönkulutus muodostaa noin 9 prosenttia kokonaiskustannuksista. Voisikin olla järkevää näin ollen tuottaa sähköä omiin tarpeisiin höyryturbiinilla. Tällä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä laitoksen kokonaiskannattavuuden osalta.

Torrefioitujen pellettien selkeät edut ovat helpon varastoitavuuden, hydrofobisuuden ja suuren energiatiheuden johdosta logistiikkakustannuksissa, joten TOP-pelletti soveltuisi hyvin myös vientituotteeksi.

#### 4.4.3 Pelletöinti

Pelletillä on olemassa maailmanlaajuiset markkinat, ja Suomessakin pelletin käyttö on lisääntynyt viime vuosina. Pelletillä on kysyntää pienkiinteistöjen polttoaineena, sekä mahdollisesti myös kasvavassa määrin voimalaitosten polttoaineena. Vuotuinen puupel-

lettien kulutus Suomessa oli vuonna 2012 noin 200 000 tonnia, ja trendi näyttäisi olevan kasvussa. Suomessa on tällä hetkellä kuitenkin käyttämätöntä pellettintuotantokapasiteettia jo ennestään, joten lisäkapasiteetin tarve on vielä näillä näkymin epäselvä. [68]

Pelletöinti voisi tulla Mervessäkin kyseeseen pienessä mittakaavassa mahdollisesti ennen varsinaista suurta jalostamoinvestointia, sekä myös suuren biojalostamon rinnalla. Pellettitehdas on investointikustannuksiltaan verraten edullinen sekä teknologialtaan yksinkertainen, joten tämänkaltaiseen investointiin ei liittyisi yhtä suuria riskejä, kuin suureen jalostamoinvestointiin. Puupelletin markkinoiden kehitys tulevaisuudessa herättää kuitenkin epävarmuuksia. Onkin mahdollista, että TOP-pelletistä tulee erittäin varteenotettava kilpailija tavalliselle pelletille johtuen logistiikka- ja polttoteknisistä eduista, jolloin tavallisen ”valkoisen” pelletin kysyntä kärsisi.

Luvussa 4.4.3.1 käydään läpi lyhyesti keskikokoisen pellettitehtaan kustannusten muodostuminen METLA:n tutkimukseen pohjautuen. [69]

#### **4.4.3.1 Pellettitehtaan kustannusrakenne**

METLA on tutkinut 21 600 tonnia pellettiä vuodessa tuottavan pellettitehtaan kustannusrakennetta. Tämän kokoinen tehdas voisi tulla kyseeseen Mervengin tapauksessa. Raaka-aineen tarve olisi tämän kokoisella tehtaalla noin 120 000 irtokuutiometriä kosteaa (noin 50 kosteus-%) haketta, eli noin 48 000 kiintokuutiometriä. Tämä vastaa energiasisällöltään noin 0,12 TWh:a. Kyseisen tutkimuksen perusteella tärkeimmät pellettitehtaan kannattavuuteen vaikuttavat kustannustekijät ovat raaka-aineen käyttöpaikkakustannukset, sekä raaka-aineen kosteuspitoisuus ja laitoksen huipunkäyttöaika. [69]

Pellettitehtaan kustannusrakenteen osuudet vuotuisista kokonaiskustannuksista olivat seuraavat:

- Raaka-ainekustannukset keskimäärin 53 % kokonaiskustannuksista (raaka-aineen laadusta ja kosteudesta voimakkaasti riippuen)
- Lämmöntuotannon välilliset ja välittömät kustannukset olivat 1-2 %. (Huomioitavaa, että talteenotettua lämpöä käytettiin kaukolämmön tuotantoon)
- Investointikustannuksen (yht. 1,5 – 3 M€) aiheuttamat vuotuiset poistot olivat noin 8 – 10 % (suuremmat, mikäli pellettitehtaalle pitää rakentaa myös kuorimolinja raaka-aineen laadusta johtuen)
- Palkkakustannukset noin 10 - 13 %, lisäksi hallinto- ja vakuutuskulut noin 2 %
- Sähkökustannukset ovat myös huomattavat, 10 - 20 % kokonaiskustannuksista. (riippuen raaka-aineesta) [69]

21 600 tonnin kapasiteetin omaavan pellettitehtaan sähkönkulutuksen keskimääräiseksi tehoksi oli arvioitu 0,3 - 1 MWe riippuen raaka-aineen laadusta. Suuri sähkönkulutus johtuu paljon sähkötehoa vaativista murskaimista, pelletöintikoneista, puhaltimista sekä kuljettimista. Raaka-aineen ollessa kuitupuuta murskaintehon vaatimus on suurimmillaan. [69]

Kuitupuuta raaka-aineena käytettäessä keskimääräiseksi kokonaistuotantokustannuksiksi oli arvioitu 183 €/t. Tämä vastaa noin 39 €/MWh. [69] Puupelletin keskimääräinen myyntihinta pienkuluttajilla oli vuonna 2012 noin 5,5 snt/kWh, eli noin 55 €/MWh. [68] Puupelletin tuotanto näyttäisi siis kannattavalta tässä valossa.

Toisaalta VTT:n tutkimuksessa on mainittu, että suuren voimalaitoksen puupelletistä maksukyky olisi vuonna 2020 noin 24 €/MWh, joten pelletin käyttö kivihiilen korvaajana ei olisi voimalaitoksella kannattavaa ilman tukia esimerkiksi syöttötariffien muodossa. [12]

## 4.5 Raaka-aineen kustannuksista

Alustavien kustannuslaskelmien perusteella voidaan nähdä, että merkittävin kustannuserä muodostuu raaka-aineen hinnasta riippumatta jalostustekniikan valinnasta. Tämä tarkoittaa, että raaka-aineen hankintaketjun toimivuus ja tehokkuus on ensimmäinen prioriteetti, valitaan jalostustekniikaksi mikä tahansa puubiomassaa hyödyntävä tekniikka. Raaka-aineen laadun tasaisuus, sekä riittävän saannin varmistaminen on erittäin tärkeää.

Puun kosteus on merkittävässä roolissa biojalostamoprosessissa. Puu tulisi pystyä kuivaamaan luonnollisin keinoin mahdollisimman pitkälle, sillä kosteusprosentilla on suora vaikutus jalostusprosessien hyötysuhteeseen kuivurin tarvitseman lämpöenergian kautta. Esimerkkinä voidaan mainita, että ECN:n tutkimuksen mukaan torrefiointi on energiaomavarainen prosessi, mikäli (puu)raaka-aineen kosteusprosentti on alle 35 %. [62] Tämä tarkoittaa sitä, että raaka-aineen kuivaamiseen riittäisi torrefiointikaasujen poltosta saatava energia. Tästä puolestaan seuraisi huomattavia säästöjä, sillä kuivaamiseen ei tarvitsisi käyttää lisäpolttoainetta. Kaasutusprosessissa tämä tarkoittaisi sitä, että lämpöenergiaa voitaisiin käyttää muuhun hyötykäyttöön, esimerkiksi kaukolämmön tuotantoon.

Raaka-aineen jalostamon porttihinnaksi oli laskelmissa oletettu noin 20 €/MWh. Tämä vastaa noin 40 €/k-m<sup>3</sup>. Taulukossa 14 on esitetty arvioita Nurmekseen rakennettavan biojalostamon raaka-aineen porttihinnoista eri kuljetustavoilla ja etäisyyksillä. Voidaankin todeta, että tässä työssä käytettyä arviota 20 €/MWh ei voida pitää liian optimistisena.

Raaka-ainelähde	Määrä (k-m <sup>3</sup> )	Hinta (€/k-m <sup>3</sup> )	Kumulat. määrä (k-m <sup>3</sup> )	Puun hinta terminaalissa (€/k-m <sup>3</sup> )
Metsähallitus: n. 70 km keskikuljetusmatkalta	250 000	32,90	250 000	32,90
Pohjois-Karjalan Metsänhoitoyhdistys, n. 40 km keskikuljetusmatkalta	50 000	30,00	300 000	32,42
Ylä-Savon Metsänhoitoyhdistys: n. 70 km keskikuljetusmatkalta	50 000	31,10	350 000	32,23
Metsähallitus junakuljetuksina Kainuusta:	400 000	39,10	750 000	35,89
Metsähallitus ja P-K:n Mhy aluskuljetuksina Pieliseltä	100 000	38,50	850 000	36,20
Tuonti Venäjältä – energiapuuhakkeena lähialueilta	100 000	30,00	950 000	35,55
Tuonti Venäjältä – energiapuuhakkeena Ruunaanjärveltä:	500 000	35,00	1 450 000	35,36
Terminaalikustannus/operaattorin veloitus (arvio):		9,30		

*Taulukko 14. Raaka-aineen arvioitu hinta Nurmekseen kaavaillulla biojalostamolla. [71]*

## 4.6 Biojalostamoprojektin läpivientiaikataulu

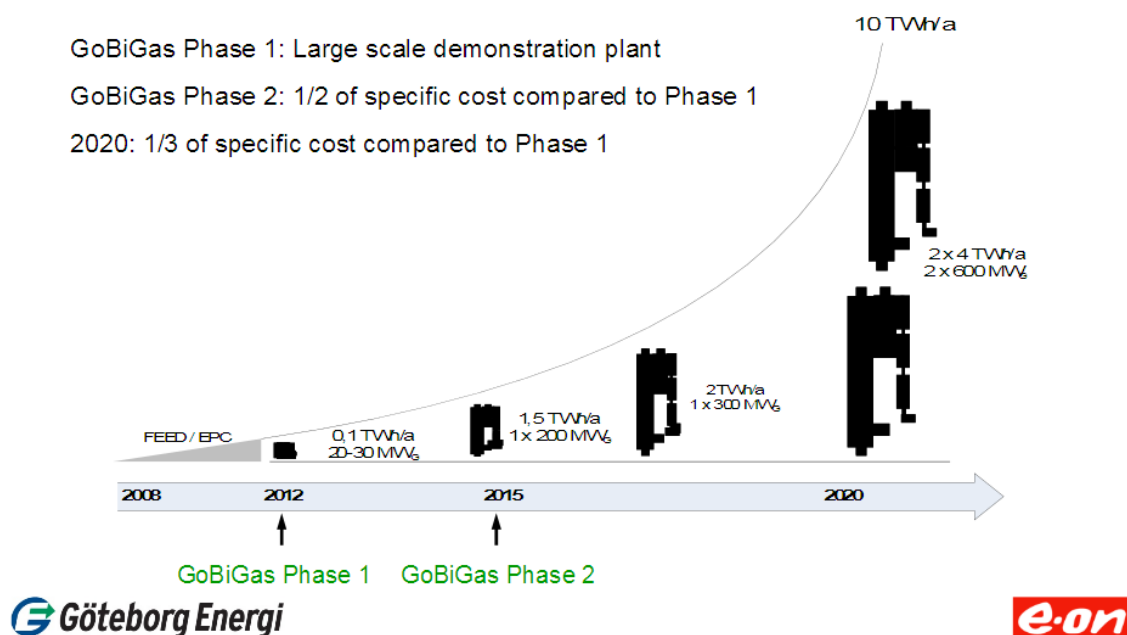
Uudet biojalostustekniikat, joita tässä työssä on käyty läpi, ovat suurimmaksi osaksi pilotointi / demonstraatiovaiheessa. Sekä torrefiointia, että SNG-tuotantoa kaasutuksen avulla on testattu pienessä mittakaavassa. Kaupallinen taso saavutetaan yleensä kuitenkin vasta, kun teknologiaa on koeteltu useamman suuren kokoluokan laitoksen muodossa kymmeniä, tai jopa satoja tuhansia tunteja. Mikäli siis Merveen päätettäisiin rakentaa tällä vuosikymmenellä kyseisiä teknologioita hyödyntävä biojalostamo, on huomioitava, että tällöin olisi kyse demo-laitoksesta, jonka täydelliselle toiminnalle ei luonnollisesti voida antaa täysiä takeita. Näiden teknologioiden tämän hetkisen tilanteen hahmottamiseksi voidaan käyttää referenssinä maailmalla tällä hetkellä käynnissä olevia projekteja.

### *SNG*

Kaasutuksen avulla tuotetun SNG:n tärkein referenssikohde tällä hetkellä on Ruotsiin Göteborgiin rakenteilla oleva GoBiGas-projekti. Kyse on Göteborg Energi:n omistaman voimalaitoksen viereen rakennettavasta, epäsuoraa kaasutusta hyödyntävästä SNG-jalostamosta. Jalostamo rakennetaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen vaihe käsittää 20 MW<sub>sng</sub> SNG -tuotantokapasiteetin. Toisen vaiheen on määrä olla kapasiteetiltaan noin 80 MW<sub>sng</sub>. Hanketta on yhteistyössä toteuttamassa Göteborg Energi, Metso Power,





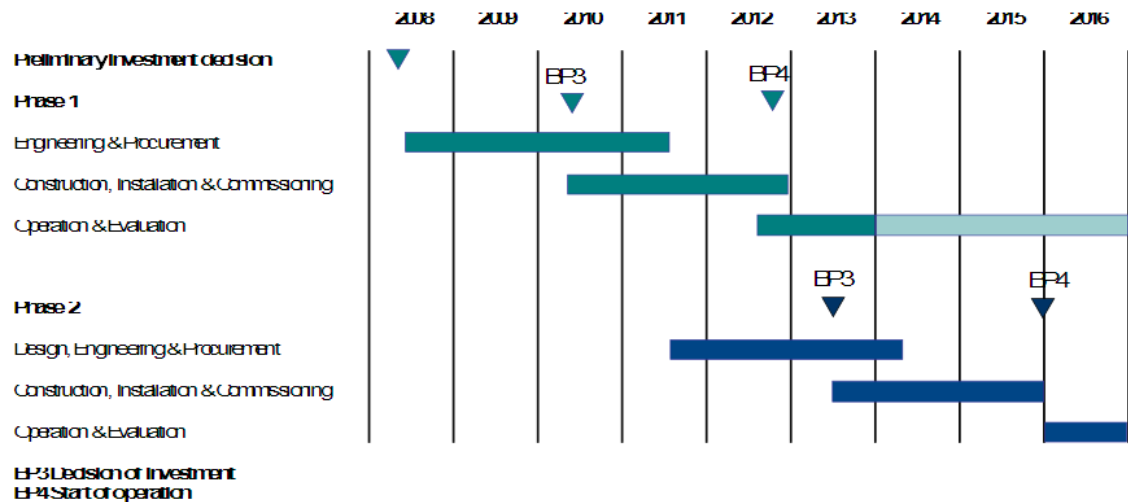


Kuva 14. E.ON:n näkemys SNG-tuotannon skaalautumisesta isoon kokoluokkaan. [75]

Kuvassa 14 on E.ON:n ja Göteborg Energi:n näkemys SNG-jalostamoiden kehityskaa-  
 resta tämän vuosikymmenen loppuun mennessä. On nähtävissä, että Merveen sopivan  
 kokoisen jalostamon on arvioitu olevan ”kolmatta sukupolvea”, eli GoBiGas vaihe 2:n  
 jälkeen rakennettava laitos.

Etelä-Ruotsiin on suunnitteilla E.ON:n toimesta myös työnimellä Bio2G kulkeva bio-  
 SNG –jalostamo. Tämä jalostamo on kokoluokaltaan ja toimintaperiaatteeltaan saman-  
 kaltainen, kuin luvussa 4.4.1 Merveen hahmoteltu SNG-jalostamo. Tämän projektin  
 alustava aikatauluarvio on nähtävissä kuvassa 16. Tämän hetken tietojen mukaan pro-  
 jekti olisi tauolla taloudellisista syistä johtuen. [76] Bio2G ei saanut EU:lta NER300-  
 avustusta, mutta se on varasijalla GoBiGas:n 2. vaiheelle. [77]

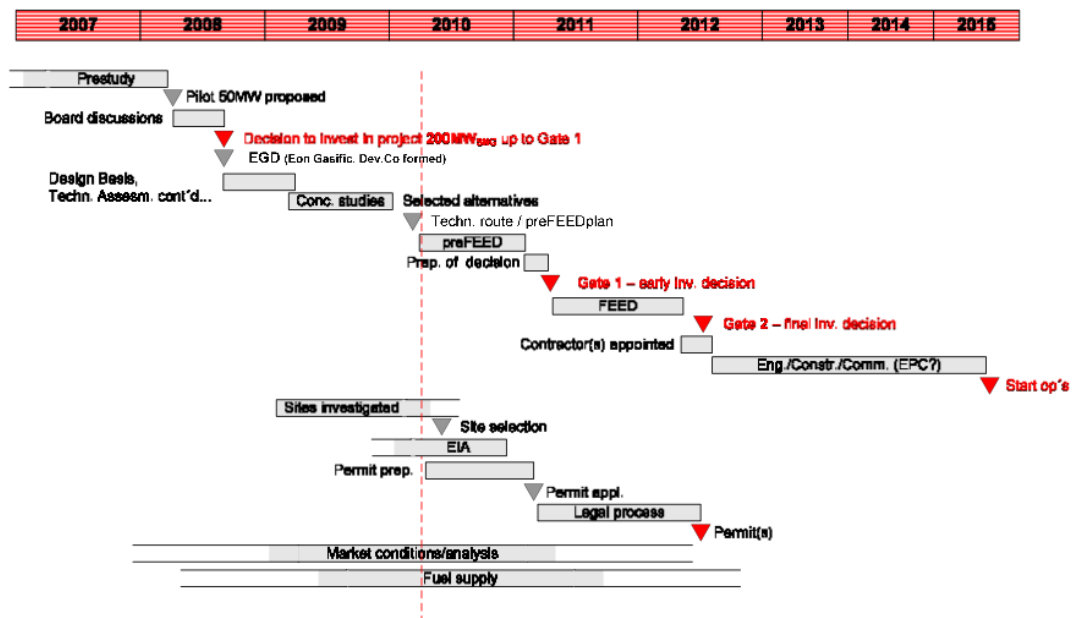
# GoBiGas – Main time schedule



Kuva 15. GoBiGas –projektin arvioitu aikataulu. [75]



## Time schedule, simplified – Bio2G



Kuva 16. Bio2G -projektin arvioitu aikataulu. Lähde E-ON. [48]

Lappeenrannan Joutsenoon on Gasum OY:n, Helsingin Energian ja Metsä Fibre OY:n toimesta suunnitteilla tuotantoteholtaan 200 MW:n suuruinen SNG-jalostamo. Tämä jalostamo vastaisi vuotuisella 1,3 miljoonan kiintokuution puunkäytöllään kokoluokal-

taan Merveen sopivaa jalostamoa, joten sitä voidaan käyttää referenssinä aikatauluja arvioitaessa. Hankkessa on tällä hetkellä käynnissä YVA-menettely, jonka on määrä olla valmis elokuussa 2013. Tarvittavat tiedot investointipäätöksen tekemistä varten on määrä olla koossa vuoteen 2014 mennessä. Laitoksen arvioitu rakennusaika on kolme vuotta investointipäätöksen teosta, ja laitoksen olisi määrä olla toiminnassa vuonna 2017, mikäli toteutusedellytykset ovat edelleen voimassa. [78]

GoBiGas-, Bio2G – ja Joutsenon projekteista voidaan huomata, että jalostamon luvan-haku-, suunnittelu-, rahoitus- ja rakennusvaiheet vievät aikaa useita vuosia. On näin ollen järkevää olettaa, että mikäli Merven biojalostamoprojekti etenisi SNG-tuotannon suuntaan, näyttäisi projektiaikataulu suunnilleen samankaltaiselta näiden projektien kanssa. Jos suunnittelu aloitettaisiin vuonna 2013, tapahtuisi laitoksen käyttöönotto täl-löin todennäköisesti tämän vuosikymmenen loppupuolella.

### ***Torrefiointi***

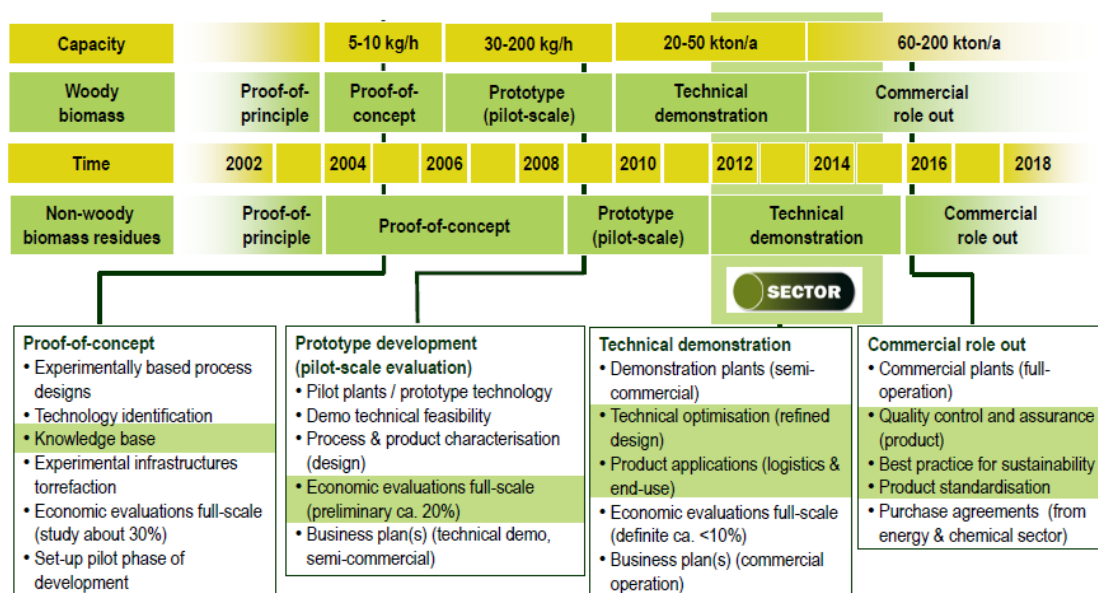
Ristiinaan on suunnitteilla suuren kokoluokan torrefiointilaitos ja biologistiikkakeskus. Torrefiointilaitoksen suunniteltu kapasiteetti on 200 000 t/a. Projekti on lähtenyt käyn-tiin vuonna 2009, ja 2010 on teetetty toteutettavuusselvitys biohiilipelletin valmistuksen osalta, joka jatkui vuonna 2011 eri torrefiointiteknologioihin ja torrefiointimarkkinoihin liittyvillä selvityksillä. Raaka-aineiden saannin osalta on tehty alustava saatavuusselvi-tys vuonna 2010. Kaavoitustyö ja liikennejärjestelyjen suunnittelu on niin ikään aloitet-tu vuonna 2011. Kaavan on tarkoitus valmistua vuoden 2013 loppuun mennessä, mutta toiminta voidaan aloittaa jo nykyisellä kaavoituksella. Laitoksen rakennustyöt on suun-niteltu toteutettavan siten, että suuren mittakaavan tuotanto alkaisi vuonna 2015. [79]

Ristiinan laitoksen tuotantokapasiteetti tarkoittaisi energiasisältönä noin 1,2 TWh:a. Tämä kokoluokka voisi vastata Merveen sopivan laitoksen kokoluokkaa. Ristiinan lai-toksen vaatimat esiselvitykset ovat olleet aikaa vieviä prosesseja, ja on huomattava, että laitos tulisi sijoittamaan alueella, jossa on jo ennestään energiantuotantoon liittyvää toimintaa, kun taas Merven tapauksessa liikkeelle lähdetään ”puhtaalta pöydältä”. Täl-löin voidaan olettaa, että kyseeseen tulisi samankaltainen aikajänne projektin läpivien-nin osalta, kuin Ristiinan torrefiointilaitoksen tapauksessa.



Kuva 17. Yleiskuva Ristiinan alueesta. Lähde Miktech. [79]

## SECTOR in the roadmap of torrefaction



Kuva 18. Torrefiointiteknologian kehityksen arvioitu aikataulu. Lähde SECTOR. [80]

Kuvassa 18 on nähtävillä Euroopan Komission rahoittaman SECTOR -työryhmän arvio torrefiointiteknologian tilasta ja kehityskaaresta. Tämän arvion mukaan 200 000 t/a teknologia olisi kaupallisesti saatavilla noin vuodesta 2014 alkaen.

## 5 TULEVAISUUDEN NÄKÖKULMAT

### 5.1 EU:n toimien vaikutus

EU:n asettamat tavoitteet uusiutuvan energian osuuden kestäväälle lisäämiselle toimivat ajavana voimana uusille bioenergiainvestoinneille. Epävarmuuksia investointien suhteen ovat kuitenkin lähiaikoina herättäneet uusien biopolttoaineisiin liittyvien direktiivien vaikutukset näiden investointien kannattavuuteen. Direktiivien sisältö ja näiden mahdollinen vaikutus on ollut vaikeasti ennustettavissa ja osaltaan haitannut bioenergiaprojektien kehitystä.

Kohdassa 2.1 käytiin läpi tällä hetkellä voimassa olevat uusiutuvan energian direktiivit sekä päästökauppa. Lähitulevaisuudessa on EU:n suunnalta tulossa tarkentavia direktiivejä muun muassa kiinteiden biomassojen kestävyyskriteerien muodossa. Bionesteille kyseiset kriteerit ovat jo olemassa, ja näiden kansallinen soveltaminen lain muodossa alkaa Suomessa 1.7.2013. Näiden lisäksi Euroopan Komission taholta on odotettavissa direktiiviesityksiä koskien epäsuoria maan käytön muutoksia. Mahdolliset korjaustoimet epäonnistuneen päästökaupan osalta ovat myös mahdollisia päästökauden 2013 - 2020 aikana.

#### 5.1.1 ILUC

ILUC, eli Indirect Land Use Change, tarkoittaa karkeasti ottaen biopolttoaineiden raaka-aineiden korjuusta tai viljelystä epäsuorasti aiheutuvia maan käytön muutoksia. Direktiiviesityksellä halutaan ottaa huomioon biopolttoaineiden eri raaka-aineiden erilaiset vaikutukset ilmakehään ja ympäristöön. Epäsuora maankäytön muutos voisi olla esimerkiksi sademetsän raivaus energiakasviviljelmän tieltä, silloin, kun nämä kasvit kuljetetaan esimerkiksi Eurooppaan biopolttoaineiden raaka-aineiksi. Tällöin kyseinen raaka-aine saisi oman ILUC-kertoimen, jonka perusteella kyseistä raaka-ainetta esimerkiksi verotettaisiin. Jokaisen biopolttoaineiden valmistajan pitäisi ottaa ILUC-kertoimet huomioon raportoidessaan esimerkiksi kasvihuonekaasujen vähenemästä. Käytännössä siis ILUC kerroin olisi parempi, mikäli raaka-aineena toimisivat esimerkiksi jätteet tai tähteet. Epäselvyyksiä aiheuttaa ILUC-kertoimien soveltaminen metsäenergian tapauksessa, eritoten kuitupuun energiakäytössä. [81]

### 5.1.2 LULUCF

LULUCF tulee sanoista Land Use, Land Use Change and Forestry. Karkeasti ottaen tällä tarkoitetaan siis ihmisen aiheuttamia maankäytön muutoksia ja muutoksia metsien ja soiden hiilinieluissa. LULUCF:n tarkoituksena on muodostaa CO<sub>2</sub>-päästöille yhte-näiset laskentasääntöohjeistukset EU:n jäe-valtioille. Laskenta kattaisi siis metsissä, soil-la ja maataloudessa tapahtuvat maan käytöstä johtuvat muutokset luonnon hiilinieluissa. Direktiivistä on tehty esitys, ja se on hyväksytty Euroopan Parlamentin toimesta Maa-liskuussa 2013. Direktiivin voimaantulo on aikaisintaan kesällä 2013. Direktiivi ei sisäl-lä rajoituksia päästöjen suhteen tässä muodossa, mutta mahdollisesti tulevaisuudessa esimerkiksi direktiivin kansallisen implementoinnin yhteydessä. [82]

### 5.1.3 Bioenergian kestävyyskriteerit

Biopolttoaineille on osana RES-direktiiviä luotu kestävyyskriteerit, jotka varmistavat, että biopolttoaineiden tuotanto on kestävä energiantuotannon mukaista. Kestävyyskri-teerit tulevat voimaan osana Suomen lainsäädäntöä 1.7.2013, ja ne koskevat nestemäisiä biopolttoaineita. Kiinteitä biopolttoaineita koskevat kestävyyskriteerit ovat valmistelun alla Euroopan Komissiossa, ja ne astuvat voimaan heinäkuussa 2013. Näiden sovelta-minen kansallisessa lainsäädännössä tapahtuu myöhemmin. Näiden kriteerien mahdolli-nen vaikutus kiinteitä biomassoja hyödyntäville voimalaitoksille ja biojalostamoille voi olla erittäin merkityksellinen. Kiinteiden biomassojen kestävyyskriteerit tulevat toden-näköisesti olemaan samankaltaiset nestemäisiä biopolttoaineita koskevien kriteerien kanssa. [83]

Nestemäisiä biopolttoaineita koskevat kestävyyskriteerit ovat seuraavat:

#### 1. Kasvihuonekaasupäästövähennys

- Biopolttoaineen elinkaaren aikainen päästövähennys tulee olla vähintään 35 % verrattuna vastaavaan fossiiliseen polttoaineeseen (2018 alkaen vähintään 60 %)

#### 2. Biologinen monimuotoisuus

- polttoaineiden valmistuksessa ei käytetä raaka-aineita, jotka ovat peräisin biolo-gisesti monimuotoisilta alueilta

#### 3. Maankäytön muutos

- Raaka-aineiden tuotannon ei tule johtaa runsashiilisten alueiden maankäytön muutokseen

#### 4. Turvemaiden kuivattaminen

- Raaka-aineiden hankinta ei johda aiemmin kuivaamattomien soiden kuivattami-seen

## 5. Maatalouden raaka-aine

- Valmistuksessa käytettyjen maatalouden raaka-aineiden tuotannossa noudatetaan EU:n tukipolitiikan mukaisesti hyvän maatalouden ja ympäristön vaatimuksia [83]

### 5.1.4 Päästökauppa

Päästökaupan kausi 2013 – 2020 on lähtenyt käyntiin huutokauppojen merkeissä. Päästöoikeuksien huutokauppahinnat ovat jääneet odotettua alhaisemmiksi, sillä päästöoikeuksista on ollut ylitarjontaa.



Kaavio 5. Päästöoikeuden hinta helmi-maaliskuussa 2013. [84]

Euroopan Unionissa on esitetty asian korjaamiseksi kevään 2013 aikana ehdotus, jonka mukaan vuosina 2013 – 2015 huutokaupattavista päästöoikeuksista 900 miljoonaa siirrettäisiin vuosille 2019 – 2020, jolloin päästöoikeuden hintatasoa saataisiin nousemaan. Tämä vaikuttaisi positiivisesti bioenergiainvestointien kannattavuuteen. Esityksen voimaantulosta sellaisenaan ei ole tällä hetkellä varmuutta. [84]

## 5.2 Sähkön tuotantotuki voimalaitoksilla

Puupolttoaineisiin perustuvalle sähkön tuotannolle on saatavissa tukitariffi, joka on lakiin määritellyn tavoitehinnan ja toteutuneen markkinahinnan suuruinen. Mahdollisia biojalosteita, kuten torrefioitua puuta ja pyrolyysiöljyä, on Suomen uuden kansallisen Energia- ja ilmastostrategian mukaan määrä tukea uuden teknologian investointituilla sähköntuotannon tariffien sijaan. [85]



VTT:n kivihiilen korvausta käsittelevän tutkimuksen mukaan metsähakkeen syöttötariffin korotukselle ei ole perusteita, sillä se ohjaisi metsähakkeen käytön voimalaitoksiin muista käyttökohteista. Sen sijaan biojalosteille suunnattu tuki voisi tulla kysymykseen ja sen suuruus voisi olla metsähakkeen tukea korkeampi, jos samalla asetettaisiin kivihiilen korvaamiselle minimitaso, esimerkiksi 150GWh. [11]

### 5.3 SNG-kaasutuksen ja torrefioinnin kehitysnäkymät

#### *SNG*

SNG:llä jalosteena on selkeät markkinapotentiaali ja kiinnostus sen käyttöön fossiilisten polttoaineiden korvaajana on suuri. Hidasteena sen tuotannolle on tällä hetkellä teknologian kypsyys. SNG valmistukseen sopivaa kaasutusteknologiaa kehitetään maailmalla tällä hetkellä vauhdilla, ja Suomi on tässä tutkimuksessa edelläkävijänä. Olennaisena osana prosessin toiminnan kannalta on kaasutin ja kaasunpuhdistuslaitteisto. SNG valmistukseen tällä hetkellä kehitettäviä kaasutinmalleja on käytännössä kahdenlaisia. Pie-nempään noin 50 – 200 MW kaasutusteholuokkaan pääpaino on epäsuorassa kaasutuksessa. Tämän teknologian kärjessä on tällä hetkellä Göteborgiin rakenteilla oleva Go-BiGas projekti, jossa kaasuttimena on Itävaltalaisen REPOTEC:n teknologiaan perustuva, Metson lisensoima epäsuora kaasutinteknologia.

Suureen, yli 200 MW kokoluokkaan mahdollisesti paremmin soveltuva kaasutusteknologia käsittäisi suoran, korkeassa paineessa toimivan vesihöyry-/happikaasuttimen, joka perustuisi leijupetikaasutukseen. Tämänlaista teknologiaa on pilotoinut Andritz USA:ssa Chicago:ssa yhteistyössä Gas Technology Institute:n kanssa. [86]

Niin ikään suoraa happi/höyrykaasutusta on pilotoinut Foster Wheeler Varkaudessa sijaitsevalla koelaitoksella yhteistyössä Nesto Oil:n ja Stora Enson kanssa vuosina 2009 - 2011 onnistuneesti. Kaasuttimen koko pilot-hankkeessa oli 12 MW. Tällöin kokeet keskittyivät yksinomaan Fischer-Tropsch-synteesin testaamiseen, mutta kaasutusteknologia mahdollistaisi myös synteesikaasun SNG:ksi jalostamisen. Suora happi/höyrykaasutus on todettu toimivaksi pilot-mittakaavassa, joten seuraava askel on todennäköisesti demo-laitos suuressa kokoluokassa. Teknologian skaalaus 300 MW kokoluokkaan on todettu mahdolliseksi 3D-laskentamallien avulla. [86] [89]

SNG:n tuotannon kehittämiseksi on menossa maailmalla useita hankkeita, ja Suomessa oleellista tutkimustyötä tekee tällä hetkellä VTT projektinimellä VETAANI. Projektin päämääränä on puubiomassasta valmistetun SNG:n prosessien kehitys ja optimointi niin teknologisessa, kuin taloudellisessa mielessä. Projekti on alkanut vuonna 2011, ja sen

on määrä valmistua 31.12.2013. On selvää, että tulokset tästä tutkimusprojektista ovat erittäin tärkeitä muun muassa seuraavaa suuren kokoluokan SNG-demolaitosta ajatellen. [87]

SNG-jalostamon metanointiosuus on tällä hetkellä kaupallisessa vaiheessa olevaa teknologiaa, ja esimerkiksi GoBiGas-projektissa sen toimittaa Tanskalainen yhtiö Haldor-Topsoe. [72]

### ***Torrefiointi***

Torrefiointia kehitetään paitsi laitevalmistajien toimesta, myös Euroopan komission rahoittamassa SECTOR -hankkeessa, jonka tarkoitus auttaa torrefioidun polttoaineen markkinoiden syntymisessä. Hankkeessa on mukana 21 eri toimijaa 9:stä eri EU-maasta, ja hankkeen budjetti on noin 10 miljoonaa euroa. Hanke on alkanut 1.1.2012 ja sen on määrä jatkua 30.6.2015 asti. Hankkeen tarkoituksena on:

- Tukea torrefiointiin perustuvien bioenergiankantajien markkinoille tuomista
- Edelleen kehittää torrefiointiteknologiaa kaupalliselle tasolle
- Kehittää vartenotettavia tuotantoreseptejä
- Kehittää standardisoidut metodit torrefioidun tuotteen laadun, logistiikan, varastoinnin ja loppukäytön arvioimiseksi, sekä luoda standardit varsinaiselle torrefioidulle lopputuotteelle
- Torrefioinnin koko elinkaaren kestävyysanalyysin laatiminen Euroopan bioenergiamarkkinoilla
- Saatujen tutkimustulosten ja tietojen levitys teollisuuden toimijoiden ja kansainvälisten foorumien hyödynnettäväksi [80]

## **5.4 Biojalostamon joustavuus ja laajennettavuus**

Suuren biojalostamon tapauksessa prosessissa syntyvän ylijäämälämmön tehokas hyödyntäminen on tärkeää. Tällä voidaan vaikuttaa myönteisesti laitoksen hyötysuhteeseen ja tätä kautta syntyviin kustannuksiin. Merven tapauksessa huomionarvoista on, että olemassa oleva kaukolämpöverkko mahdollistaa ylijäämälämmön hyötykäytön kaukolämpöenergiana tietyin edellytyksin. Kaukolämmön tarve vaihtelee kausiluonteisesti, kun taas biojalostamo toimii oletuksena vakioteholla ympäri vuoden, pois lukien noin kuukauden mittaista huoltosesonkia. Tämä tarkoittaa, että ylijäämälämmön kohdistamista kaukolämpöverkkoon tulee pystyä säätämään tarpeen mukaan. Tilanteessa, jolloin lämmön tarve on pienempi, kuin laitoksen synnyttämä ylijäämälämmön määrä, on läm-

mölle varmistettava vaihtoehtoinen käyttökohde. Luonnollisesti huonoin mahdollinen vaihtoehto on lämmön siirto jäähdytysjärjestelmän avulla ympäristöön. Pitkällä aikavälillä kaukolämmön tarpeen odotetaan jopa vähenevän paremman rakennustekniikan ansiosta, joten kaukolämmön säätötarve tulee tuskin ainakaan vähenemään tulevaisuudessa. Ilmaston lämpenemisellä saattaa myös olla vaikutuksia kaukolämmön tarpeeseen tulevaisuudessa. [88]

Biojalostamoon tulisikin voida integroida tukevia prosesseja mahdollisen lämmön hyötykäyttöksi. Tällainen voisi olla esimerkiksi suureen SNG-jalostamoon integroitu pieni pellettilinja, jossa SNG-tuotannosta saatava ylijäämälämpö voitaisiin hyödyntää puun kuivaamiseen ja pelletin valmistukseen tarvittavana lämpöenergiana silloin, kuin kaukolämmön tarve on pienimmillään. Pellettilinja toimisi tällöin kaukolämmön tarpeen ”säätökapasiteettina”. Tuotetun pelletin kustannukset olisivat lämmön ylijäämäluonteesta johtuen kohtuulliset. Vaihtoehtoisesti suuren SNG-jalostamon yhteyteen voisi sopia ylijäämälämmön käyttäjäksi myös pienen kokoluokan torrefiointiyksikkö pellettilinjan sijaan. Ylijäämälämmön hyödyntäminen muussa lämpöä tai prosessihöyryä tarvitsevassa teollisuudessa voisi niin ikään tulla kysymykseen Merven teollisuusalueella.

Torrefiointilinjan lisääminen olemassa olevan SNG-jalostamon yhteyteen olisi toteutettavuudeltaan järkevä laajennuskeino jalostamon toiminnalle, mikäli raaka-aineita olisi tarjolla arvioitua enemmän. Toisin kuin suuri kaasutukseen perustuva jalostamo, torrefiointilaitos voi koostua yhdestä tai useammasta pienen kapasiteetin omaavasta torrefiointilinjasta. Tällöin etuna on, että linjoja voidaan rakentaa olemassa olevan SNG-jalostamon yhteyteen yksi tai tarvittaessa useampia. Tällä tavalla toimii esimerkiksi Andritz:n tarjoama kaupallisessa vaiheessa oleva ACB-torrefiointikonsepti, jossa yhden torrefiointiyksikön kapasiteetti on 50 000 t/a. [34]

Kuten luvun 4.4.1 yhteenvedossa oli mainittu, voisi kaasutuksesta saatavaa synteetikaasua käyttää myös muiden jalosteiden valmistamiseen. Tämä tietysti vaatisi rakenteellisia muutoksia laitokseen synteetikaasun jalostamiseksi toiseen muotoon. Kyseinen järjestely voisi tulla kyseeseen lähinnä silloin, kuin vaihtoehtoisesta jalosteesta saatava hinta olisi SNG:tä huomattavasti korkeampi. Tällainen tilanne onkin tällä hetkellä arvioitaessa hyvin epätodennäköinen.

Happikaasutukseen perustuva SNG-jalostamo tarvitsee erillisen ilmakaasulaitoksen, jossa ilma nesteytetään paineistamalla ja tislataan haluttuihin jakeisiin. Erotettu happi käytetään kaasutusprosessissa, jolloin ilmakaasulaitoksella erotettu typpi sekä argon voitaisiin hyödyntää muihin tarkoituksiin.

## 6 YHTEENVETO

Biojalostamoiden rakentaminen ja niiden kannattavuus perustuu Euroopassa vallitsevaan ilmastopolitiikkaan ja haluun vähentää energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä. EU:n ilmastotavoitteet vuodelle 2020 tarkoittavat merkittävää bioenergian osuuden lisäämistä energiantuotannossa. Suomen kansallisen Energia- ja Ilmastostrategian mukaan 2/3 uusiutuvan energian käytön lisäämisestä aiotaan toteuttaa metsäbiomassalla. Tämän tavoitteen saavuttaminen vaatii suuria investointeja uuteen teknologiaan, esimerkiksi biojalostamoihin, ja investointien toteutumiseksi Suomen valtio on ilmoittanut Energia- ja Ilmastostrategiassa jakavansa uutta teknologiaa demonstroiville hankkeille investointitukea.

Puubiomassan termokemialliset jalostusteknologiat alkavat olla demonstroitivaiheessa, ja erilaisia ratkaisuja biojalostamon teknologiaksi löytyy paljon. Sopivimman teknologian valinta onkin tapauskohtaista, ja riippuu monesta asiasta. Tärkeä seikka teknologiasta riippumatta on tehokas lämmön hyötykäyttö ja integrointi, ja tästä seuraava laitoksen hyötysuhteen parannus. Muun muassa tästä syystä biojalostamon integrointi olemassa olevaan teollisuuteen tai voimalaitoksen yhteyteen on kannattavaa.

Merven tapauksessa SNG-kaasutuksen valintaa mahdollisen biojalostamon teknologiaksi puoltaa maakaasuverkon läheisyys. Alueen keskeinen sijainti Etelä-Suomen alueella, hyvät kulkuyhteydet, kaukolämpöverkon hyödyntämismahdollisuus sekä raaka-aineiden saatavuus tukevat myös Merven alueen valintaa biojalostamon sijainniksi.

SNG-jalostamon vartenotettava teknologia on demonstroitivaiheessa, ja kaasutusteknologiaksi olisi käytännössä 2 vaihtoehtoa, suora paineistettuun leijukerrokseen perustuva happi/höyry-kaasutus tai GoBiGas-tyyppinen epäsuora kaasutus. Metanointiosuus on kaupallista teknologiaa. Suurimmat epävarmuudet teknologioiden suhteen liittyvät kaasutuksen jälkeiseen kaasun katalyyttiseen puhdistukseen ja reformointiin. Katalyyttimateriaalien tukkeutuminen tervan sekä muiden epäpuhtauksien johdosta on aiheuttanut ongelmia kaasun käsittelyssä.

Kriittisimmät tekijät SNG-jalostamon kannattavuutta ajatellen ovat raaka-aineen porttihinta, SNG:n myyntihinta sekä investoinnille saatavien tukien määrä. Raaka-aineiden osuus vuotuisista kokonaiskustannuksista on yli 50 %. Raaka-aineen hinnan lisäksi sen

laatu ja kosteusprosentti vaikuttavat prosessin hyötysuhteeseen, joten raaka-aineen hankintaketju on hankkeen kannattavuutta ajatellen erittäin tärkeässä asemassa.

Torrefioidun tai tavallisen pelletin valmistus sopisi myös Merven biojalostamon teknologiaksi, mutta SNG-konseptiin verrattuna logistiikkahaasteet olisivat huomattavasti suuremmat. SNG:llä voidaan katsoa olevan myös valmiimmat markkinat lähitulevaisuudessa. SNG omaa suuren potentiaalin paitsi voimalaitosten, myös liikenteen polttoaineena.

Vaihtoehtoisena jalostamoteknologiana tarkasteltiin torrefiointia, joka alkaa niin ikään olla kaupallisen kokoluokan demonstrointivaiheessa. Torrefiointin pilotointi-hankkeita on Euroopassa useita, joista suurin omaa kapasiteetin 60 000 t/a. Torrefiointiteknologioita on olemassa useita erilaisia. Torrefiointin kannattavuuden kannalta kriittisimmät kohdat olivat niin ikään raaka-aineen porttihinna sekä valmiin jalosteen myyntihinna. Investointikustannukset käsittävät vuotuisista kuluista noin 10 % ilman investointitukia, joten ne eivät ole yhtä suuressa roolissa kuten SNG-jalostamon tapauksessa. Torrefiointi teknologiana on tästä huolimatta kuitenkin tavalliseen pellettitehtaaseen verrattuna kaltaisin investointi. Myös sähkönkulutus muodostaa huomattavan kuluerän, noin 10 % vuotuisista tuotantokustannuksista johtuen mm. paljon sähköä kuluttavista murskaimista, pellettointikoneista. Tavallisen pellettitehtaan sähkönkulutus on myös lähes yhtä merkittävää.

Tässä työssä tarkempaan tarkasteluun ei valittu pyrolyysiöljyn valmistukseen perustuvia teknologioita. Voidaan kuitenkin todeta, että nopeaan pyrolyysiin perustuva teknologia on torrefiointin ja kaasutuksen ohella kaupallisessa demonstraatiovaiheessa, ja sillä on mahdollisesti potentiaalia myös suurten biojalostamojen teknologiaksi. Pyrolyysiöljy soveltuu sellaisenaan kevyen ja raskaan polttoöljyn korvikkeeksi vaatien suhteellisen pieniä muutoksia voimalaitospäässä. Jatkojalostamalla siitä olisi myös mahdollista valmistaa liikennepolttoaineita. Pyrolyysiöljyn kuljetus on myös helppoa nestemäisestä olemuksesta johtuen.

Kuljetuskustannukset ovat tärkeässä roolissa niin raaka-aineen hankintaketjussa, kuin valmiiden jalosteidenkin kuljettamisessa. Jalostamotyyppin valintaan vaikuttaakin huomattavasti se, kuinka kauas valmiita jalosteita olisi määrä kuljettaa. Mitä parempi energiatiheys polttoaineella on, sitä pidemmällä sitä kannattaa kuljettaa. Tämä on tärkeää huomioida, mikäli valittavana on tavallisen, tai torrefioidun pelletin valmistus biojalostustekniikaksi.

Kannattavuusarvioiden perusteella niin SNG-jalostamo, kuin torrefiointilaitos voidaan saada kannattavaksi, erityisesti uuden teknologian investointitukien kanssa. Kaikkien biojalosteiden mahdolliseen myyntihintaan vaikuttavat merkittävästi poliittiset päätök-

set. Tulevat kiinteiden biopolttoaineiden kestävyyskriteerit saattavat myös vaikuttaa biojalosteiden hintaan negatiivisesti.

Tämän hetkiset päästöoikeuden hinnat eivät suosi biojalosteiden käyttöä energiantuotannossa, mutta odotettavissa on, että päästöoikeuden hinnat tulevat tulevaisuudessa nousemaan merkittävästi, sillä jaettavien päästöoikeuksien kokonaismäärä vuoden 2020 jälkeen vähenee todennäköisesti huomattavasti. Tällöin biojalosteiden tuotanto on todennäköisesti entistä kannattavampaa.

## LÄHTEET

- [1] Sugarcane.org, Brazilian transportation fleet, <http://sugarcane.org/the-brazilian-experience/brazilian-transportation-fleet>
- [2] Mongabay.com, Malaysia Forest Information And Data, 2011, <http://rainforests.mongabay.com/deforestation/2000/Malaysia.htm>
- [3] IEA Key World Energy Statistics 2012, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>
- [4] Dornburg, V., Faaij, A., Verweij, P., Langeveld, H., van de Ven, G., Wester, F., et al., Biomass Assessment: Global biomass potentials and their links to food, water, biodiversity, energy demand and economy, main report, Netherlands Environmental Assessment Agency, 2008
- [5] A bottom up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050, Smeets, E. et al, Copernicus Institute of Sustainable Development and Innovation, The Netherlands, February 2007, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128506000359>
- [6] EU 27 Energy Key Figures, European Commission, [http://ec.europa.eu/energy/observatory/countries/doc/key\\_figures.pdf](http://ec.europa.eu/energy/observatory/countries/doc/key_figures.pdf)
- [7] Renewable Energy Statistics, European Commission, EuroStat, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Renewable\\_energy\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Renewable_energy_statistics)
- [8] File:Primary production of renewable energy, 2000 and 2010.png, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php?title=File:Primary\\_production\\_of\\_renewable\\_energy,\\_2000\\_and\\_2010.png&filetimestamp=20121012133631](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php?title=File:Primary_production_of_renewable_energy,_2000_and_2010.png&filetimestamp=20121012133631)
- [9] Energiamarkkinavirasto, Kestävyysskriteerit, <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/alasivu.asp?gid=477&pgid=477&languageid=246>
- [10] Teollisuuden päästödirektiivin (IED) voimaansaattaminen ja muita ympäristönsuojelulain kehittämisajatuksia, Puheloinen E-M, Ekroos A., Warsta M., et al., Ympäristöministeriö
- [11] Kansallinen energia- ja ilmastostrategia, Taustaraportti, TEM, 21.3.2013, [http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen\\_energia-\\_ja\\_ilmastostrategia\\_taustaraportti.pdf](http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_taustaraportti.pdf)
- [12] Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa, Flyktman M., Kärki J, Hurskainen M, Helynen S, Sipilä K, VTT 2011, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2595.pdf>
- [13] Finlex, Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta, <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396#a1396-2010>
- [14] Uusiutuvan energian tuet EU-maissa, Energiateollisuus, Marja-Aho, L., 2011, s.61,

- [http://energia.fi/sites/default/files/energiteollisuus\\_raportti\\_28\\_9\\_2011\\_2.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/energiteollisuus_raportti_28_9_2011_2.pdf)
- [15] Työtä ja hyvinvointia Hämeen metsistä, Vaihe 4: Energiapuun hankinta, Jyri Makkonen KY, 01.2013
  - [16] Energiatehokkuusdirektiivi (2012/27/EU), <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:FI:PDF>
  - [17] Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Prins, M. J., 2005
  - [18] Poltto ja Palaminen, toinen painos, Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., Kurki-Suonio, I., 2002, s. 186-232
  - [19] Development of the MILENA gasification technology for the production of Bio-SNG, van der Meijden, C. M., 2010, s. 11-30
  - [20] Biomass Gasifier Database for Computer Simulation Purposes, Hansson, J., et al., Elokuu 2011, Svenskt Gastekniskt Center
  - [21] Poltto ja Palaminen, toinen painos, Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M., Kurki-Suonio, I., 2002, s. 567-584
  - [22] HVI Gastech, [http://www.hvigastech.org/img/Relevance\\_p1.jpg](http://www.hvigastech.org/img/Relevance_p1.jpg)
  - [23] The gasifier site, Cross draft gasifier, [http://www.gasifyer.com/cross\\_draft\\_gasifier.htm](http://www.gasifyer.com/cross_draft_gasifier.htm)
  - [24] Synteesikaasun ja puhtaan polttokaasun valmistus, Kurkela, et. al., 2008, VTT, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P682.pdf>
  - [25] Production of synthetic biodiesel via Fischer-Tropsch synthesis, Opdal, Olav A., Norwegian University of Science and Technology, 2006 <http://www.zero.no/transport/biodrivstoff/btl-namdalen.pdf>
  - [26] Alkoholipolttoaineiden valmistus katalyyttisesti teollisista sivuvirroista, Tuuttila, T., Kokkolan yliopistokeskus Chydenius, 2010, [http://www.ketek.fi/oske/Selvitys\\_alkoholipolttoaineet\\_OSKE.pdf](http://www.ketek.fi/oske/Selvitys_alkoholipolttoaineet_OSKE.pdf)
  - [27] Direct Dimethyl Ether Synthesis, Takashi, O., et al, Journal of Natural Gas Chemistry 12(2003)219-227, <http://www.jngc.dicp.ac.cn/jngc/2003/03-04/2003-04-219.pdf>
  - [28] Fast Pyrolysis and Bio-Oil Upgrading, Brown, Robert C., et al, Iowa State University, <http://www.ascension-publishing.com/BIZ/HD50.pdf>
  - [29] Hidaspyrolyysin liiketoimintojen kehittäminen Suomessa, Fagernäs, L., et al., VTT, 2012, <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T59.pdf>
  - [30] Biomass pyrolysis processes: Review of Scope, Control and Variability, Brownsort, Peter A., UKBRC Working Paper 5, 2009, [www.biochar.org.uk/download.php?id=14](http://www.biochar.org.uk/download.php?id=14)
  - [31] Pyrolyysiöljyn polton edellytykset ja vaikutukset lämpökeskuskäytössä, Innanen, J., Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Kandidaatintyö, 2011
  - [32] BalBic, Mitä Biohiili On?, [http://www.balbic.eu/fi/mita\\_biohiili\\_on/fi\\_FI/mita\\_biohiili\\_on/](http://www.balbic.eu/fi/mita_biohiili_on/fi_FI/mita_biohiili_on/)



- [33] Torrefaction of Biomass, Schorr, Christian et al., Julkaisu 1/2012, Miktech OY
- [34] Torrefaction Seminaari Hanasaari, 29.11.2012, Jari Hiltunen, Andritz OY
- [35] Status of ECN Torrefaction Technology, Kiel, J.H.A., Presentation, May 10-11 2012, <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2012/112026.pdf>
- [36] Overview in international developments in torrefaction, Kleinschmidt, C.P., M.Sc, KEMA Nederland BV, [http://www.ieabcc.nl/workshops/task32\\_2011\\_graz\\_torrefaction/Kleinschmidt\\_Paper.pdf](http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Kleinschmidt_Paper.pdf)
- [37] Biochemical conversion of Biomass - challenges and opportunities, Kaushik, N., Biswas, S., Presentation, 14-16.12.2007, [http://www.tifac.org.in/index.php?option=com\\_content&view=article&id=774:biochemical-conversion-of-biomass-challenges-a-opportunities&catid=120:publication-bioprocess-a-bioroducts&Itemid=1380](http://www.tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=774:biochemical-conversion-of-biomass-challenges-a-opportunities&catid=120:publication-bioprocess-a-bioroducts&Itemid=1380)
- [38] Biochemical Conversion of Biomass, Asian biomass handbook, Part 5, [http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/English/Part-5\\_E.pdf](http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/English/Part-5_E.pdf)
- [39] What is bioethanol, [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/02-03/biofuels/what\\_bioethanol.htm](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/02-03/biofuels/what_bioethanol.htm)
- [40] Biodieselin valmistus kasviöljyistä vaihtoesteröintimenetelmällä, Tähtinen, A., Helsingin Yliopisto, Kandidaatintutkielma, 25.10.2007, <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/ont/tahtinen-a-2007.pdf>
- [41] Biorefine.org, Anaerobic digestion, <http://www.biorefine.org/proc/anaerobic.pdf>
- [42] Mitä biokaasu on?, Gasum, <https://www.gasum.fi/tuotteet/biokaasu/Sivut/Mitabiokaasuon.aspx>
- [43] Pellettienergia, pelletin tuotanto, 06.08.2009, <http://www.pellettienergia.fi/index.php/tietoa/pelletin-tuotanto>
- [44] Large scale production of bio methane from wood, van der Meijden, C.M. et al., ECN, 19.10.2011, <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2011/m11098.pdf>
- [45] Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi, HighBio projektijulkaisu, Lassi, U., Wikman, B., Jyväskylän Yliopisto, 2011, <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/27058/978-951-39-4313-4.pdf?sequence=1>
- [46] Kotimaista uusiutuvaa lähienergiaa Hämeestä, Jyri Makkonen KY, 2011, <http://www.jyrimakkonen.fi/Raportti08022011.pdf>
- [47] Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset, Rinne, S., Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Diplomityö, 2010
- [48] Medium scale biomass gasification for production of biomethane – The Bio2G and GoBiGas-projects, Owe Jönsson, E.ON Sverige AB, [http://sng2010.udt.cl/tl\\_files/www/congreso/sng2010\\_ppts/SNG2010\\_S02\\_03-Owe.Jonsson.pdf](http://sng2010.udt.cl/tl_files/www/congreso/sng2010_ppts/SNG2010_S02_03-Owe.Jonsson.pdf)

- [49] Biopolttoaineterminaalit, Impola, R., Tiihonen, I., VTT, 30.11.2011
- [50] Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset, Rinne, S., Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Diplomityö, s 102, 2010
- [51] System Analysis Approach to Biofuels RD&D, Ilkka Hannula, VTT, 2G2020 Biofuels Seminar, Kalastajatorppa, Helsinki, 30.08.2012, [http://www.vtt.fi/files/projects/2g\\_2020/hannula.pdf](http://www.vtt.fi/files/projects/2g_2020/hannula.pdf)
- [52] Biomass to Gas, Bram van der Drift, ECN, Presentation, 24.11.2011, London, UK
- [53] Puupolttoaineiden hintaseuranta, Pöyry, <http://www.puunhinta.fi/tilastot.htm?graph=fi-all-main>
- [54] Kiinteisiin biomassapolttoaineisiin liittyvä liiketoiminta Keski-Suomessa, Pelli, P., TEM, 59/2010, s.42, [http://www.tem.fi/files/27826/TEM\\_59\\_2010\\_netti.pdf](http://www.tem.fi/files/27826/TEM_59_2010_netti.pdf)
- [55] Maakaasun kokonaishinnan kehitys 1/2013 saakka, Energiamarkkinavirasto, Tilastot ja Lomakkeet, <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=3368&pgid=188&languageid=246>
- [56] Energiaverolakien muutokset 1.1.2011, Tulli, [http://www.tulli.fi/fi/suomen\\_tulli/julkaisut\\_ja\\_esitteet/THT/tht\\_arkisto/TH T\\_2010/tiedotteet\\_2010/21901010/index.html?bc=425](http://www.tulli.fi/fi/suomen_tulli/julkaisut_ja_esitteet/THT/tht_arkisto/TH T_2010/tiedotteet_2010/21901010/index.html?bc=425)
- [57] Yksittäisen kohteen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet, Suomi, U., Hietaniemi, J., Motiva, [http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje\\_CO2\\_kohde\\_040622.pdf](http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf)
- [58] Kaukolämpötilasto 2011, Energiateollisuus ry, 2012, [http://energia.fi/sites/default/files/kaukolampotilasto\\_2011\\_web.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/kaukolampotilasto_2011_web.pdf)
- [59] Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergiatuotannon arvoketjuissa, Tanja Ihalainen, Itä-Suomen Yliopisto, <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp166.htm>
- [60] ECN's torrefaction-based BO<sub>2</sub>-technology – from pilot to demo, Kiel J., 28.01.2011, Presentation, Graz, Austria, [http://www.ieabcc.nl/workshops/task32\\_2011\\_graz\\_torrefaction/Graz%20Kiel%202011.pdf](http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2011_graz_torrefaction/Graz%20Kiel%202011.pdf)
- [61] Topell energy and RWE Innogy build plant for production of biocoal pellets, 28.07.2010, <http://www.rwe.com/web/cms/en/113648/rwe/press-news/press-release/?pmid=4005057>
- [62] Combined torrefaction and pelletisation, The TOP process, P.C.A. Bergman, 2005, <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>
- [63] Topell on torrefaction, Topell Energy, 27-28.3.2012, Copenhagen, Denmark, [http://www.iea-coal.org.uk/publishor/system/component\\_view.asp?LogDocId=82889&PhyDocId=8395](http://www.iea-coal.org.uk/publishor/system/component_view.asp?LogDocId=82889&PhyDocId=8395)

- [64] Sähkön hinnan kehitys 1.3.2013, Energiamarkkinavirasto,  
<http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=3391&pgid=67&languageid=246>
- [65] Energiaverotus, tulli, 21.3.2013,  
[http://www.tulli.fi/fi/suomen\\_tulli/julkaisut\\_ja\\_esitteet/asiakasohjeet/valmisteverotus/tiedostot/021.pdf](http://www.tulli.fi/fi/suomen_tulli/julkaisut_ja_esitteet/asiakasohjeet/valmisteverotus/tiedostot/021.pdf)
- [66] Lämmitys- ja liikennepolttoaineiden hinnat kallistuivat, tilastokeskus, 20.3.2013, [http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2012/04/ehi\\_2012\\_04\\_2013-03-20\\_tie\\_001\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/ehi/2012/04/ehi_2012_04_2013-03-20_tie_001_fi.html)
- [67] Antti Kokko, Bio Coal Market Perspectives in Europe, Pöyry, 29.11.2012, Wood Torrefaction Workshop, Hanasaari, Espoo
- [68] Pelletin hinta- ja tilastotietoja, Pellettienergia,  
<http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20hinta-%20ja%20tilastotietoja>
- [69] Tanja Ihalainen & Lauri Sikanen, Kustannustekijöiden vaikutukset pelletin tuotannon arvoketjuissa, METLAn työraportti, 16.11.2010,  
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp181.pdf>
- [70] Thermal Pre-treatment of Biomass for Large-scale Applications, Summary and conclusions from the IEA Bioenergy ExCo66 Workshop, 27-28.3.2012, Copenhagen, Denmark, <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/conferences/2nd-workshop-on-cofiring-biomass-with-coal?>
- [71] Bioenergiaa Pielisen Karjalaan, Huikuri, N., Okkonen, L., vuosiraportti 2012, 4.12.2012, s. 73
- [72] GoBiGas, Göteborg Energi, <http://gobigas.goteborgenergi.se/En/Start>
- [73] Thermal Gasification of Biomass, IEA Task 33,  
<http://www.ieatask33.org/content/info/552>
- [74] Commission implementing decision of 18.12.2012, Award decision under the first call for proposals of the NER300 funding programme,  
[http://ec.europa.eu/clima/news/docs/c\\_2012\\_9432\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/news/docs/c_2012_9432_en.pdf)
- [75] The GoBiGas project – from biomass to biogas, Åsa Burman, Seminar at Chalmers University of Technology, 01.2010,  
[http://www.mgkke.hu/download/belso%20szakmai%20anyagok/14.%20Burman%20GoBiGas\\_CTH\\_jan2010.pdf](http://www.mgkke.hu/download/belso%20szakmai%20anyagok/14.%20Burman%20GoBiGas_CTH_jan2010.pdf)
- [76] E.ON skjuter upp beslut om Bio2G, 30.11.2012, <http://www.eon.se/om-eon/Om-energi/Produktion-av-el-gas-varme-och-kyla/Bio2G/Nyheter/>
- [77] NER300 RES first call awards as released by European Commission 18.12.2012, [http://www.ner300.com/wp-content/uploads/2012/07/NER300\\_breakdown\\_subcat\\_rankings\\_AWARDS.pdf](http://www.ner300.com/wp-content/uploads/2012/07/NER300_breakdown_subcat_rankings_AWARDS.pdf)
- [78] Gasum OY, Helsingin Energia ja Metsä Fibre OY, Joutsenon puupohjaista biokaasua tuottava biojalostamo, YVA-ohjelma, Pöyry Engineering, Helmi-

- kuu 2013, [http://www.ely-keskus.fi/fi/ELYkeskukset/KaakkoisSuomenELY/Ymparistonsuojelu/YVA/Vir\\_eilla/kemia/Documents/Joutseno%20Bio-SNG%20YVA-ohjelma.pdf](http://www.ely-keskus.fi/fi/ELYkeskukset/KaakkoisSuomenELY/Ymparistonsuojelu/YVA/Vir_eilla/kemia/Documents/Joutseno%20Bio-SNG%20YVA-ohjelma.pdf)
- [79] Ristiinan biologistiikkakeskus ja biohiilipellettitehdas, Mika Muinonen, 29.11.2012, [http://www.vtt.fi/files/projects/biohiili/mika\\_muinonen.pdf](http://www.vtt.fi/files/projects/biohiili/mika_muinonen.pdf)
- [80] SECTOR – Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction, Torrefaction Roadmap, Eija Alakangas, Biohiiliseminaari, Hanasaari, 29.11.2012
- [81] Indirect Land Use Change, European Commission, 17.10.2012, [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-12-787\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-12-787_en.htm)
- [82] LULUCF in the EU, European Commission, 12.3.2013, [http://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf/index_en.htm)
- [83] Biopolttoaineiden kestävyyskriteerit, Pekka Ripatti, Energiamarkkinavirasto, Bioenergian kestävyden osoittaminen –seminaari, Tampere, 25.10.2012
- [84] Energiamarkkinavirasto tiedottaa, s.17, 1/2013, [http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/EMVtiedottaa\\_1\\_2013.pdf](http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/EMVtiedottaa_1_2013.pdf)
- [85] Kansallinen Energia- ja ilmastostrategia, 20.3.2013, Työ- ja elinkeinoministeriö, s.48  
[https://www.tem.fi/files/36266/Energia\\_ja\\_ilmastostrategia\\_netijulkaisu\\_SUOMENKIELINEN.pdf](https://www.tem.fi/files/36266/Energia_ja_ilmastostrategia_netijulkaisu_SUOMENKIELINEN.pdf)
- [86] Biomass gasification to 2nd generation biofuels, Status Review and R&D activities at VTT, Esa Kurkela, Solander Symposium, 17.11.2011, Piteå, Ruotsi, [http://www.solandersciencepark.se/sites/default/files/media/pdf\\_filer\\_sv/esa\\_kurkela.pdf](http://www.solandersciencepark.se/sites/default/files/media/pdf_filer_sv/esa_kurkela.pdf)
- [87] Vetaani – Puuperäistä biomassaa hyödyntävän synteettisen maakaasun tai vedyn tuotantoprosessin kehittäminen ja arviointi, VTT, <http://www.vtt.fi/sites/vetaani/index.jsp>
- [88] Kaukolämmön tulevaisuus selvitys, Energiateollisuus ry, 31.8.2011, <http://energia.fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/kaukolammon-tulevaisuus selvitys-kilpailu-lammitysmarkkinoilla-lisaa>
- [89] Gasified Biomass for Biofuels production: Foster Wheeler's Technology Developments for Large Scale Applications, Juha Palonen, Gasification technologies conference, Washington, 2012